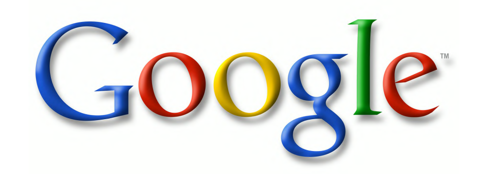
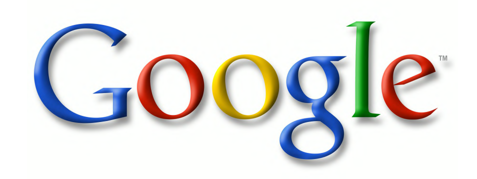





3 3433 06908869 2

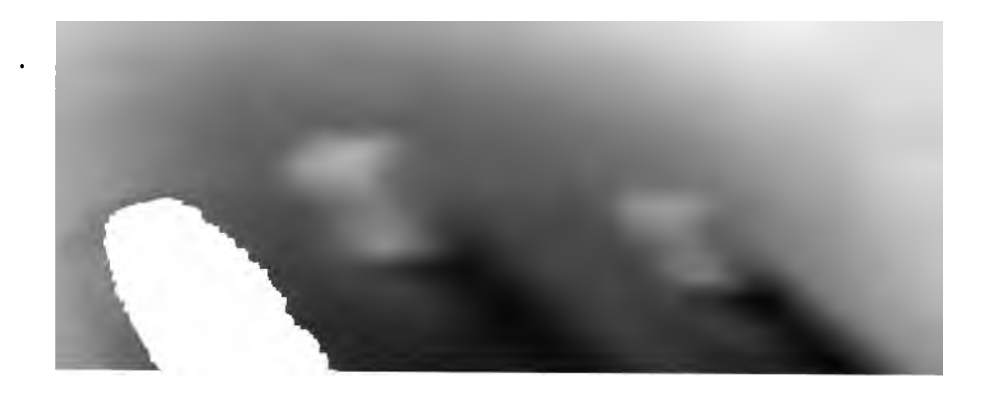






LE

MONDE PHYSIQUE



PARIS. — IMPRIMERIE A. LAHURE
Rue de Fleurus, 9

LE

MONDE PHYSIQUE

PAR

AMÉDÉE GUILLEMIN

TOME QUATRIÈME

LA CHALEUR

CONTENANT

9 GRANDES PLANCHES TIRÉES A PART DONT 1 EN COULEUR

ET 324 VIGNETTES INSÉRÉES DANS LE TEXTE



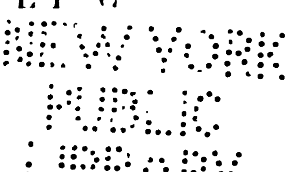
PARIS

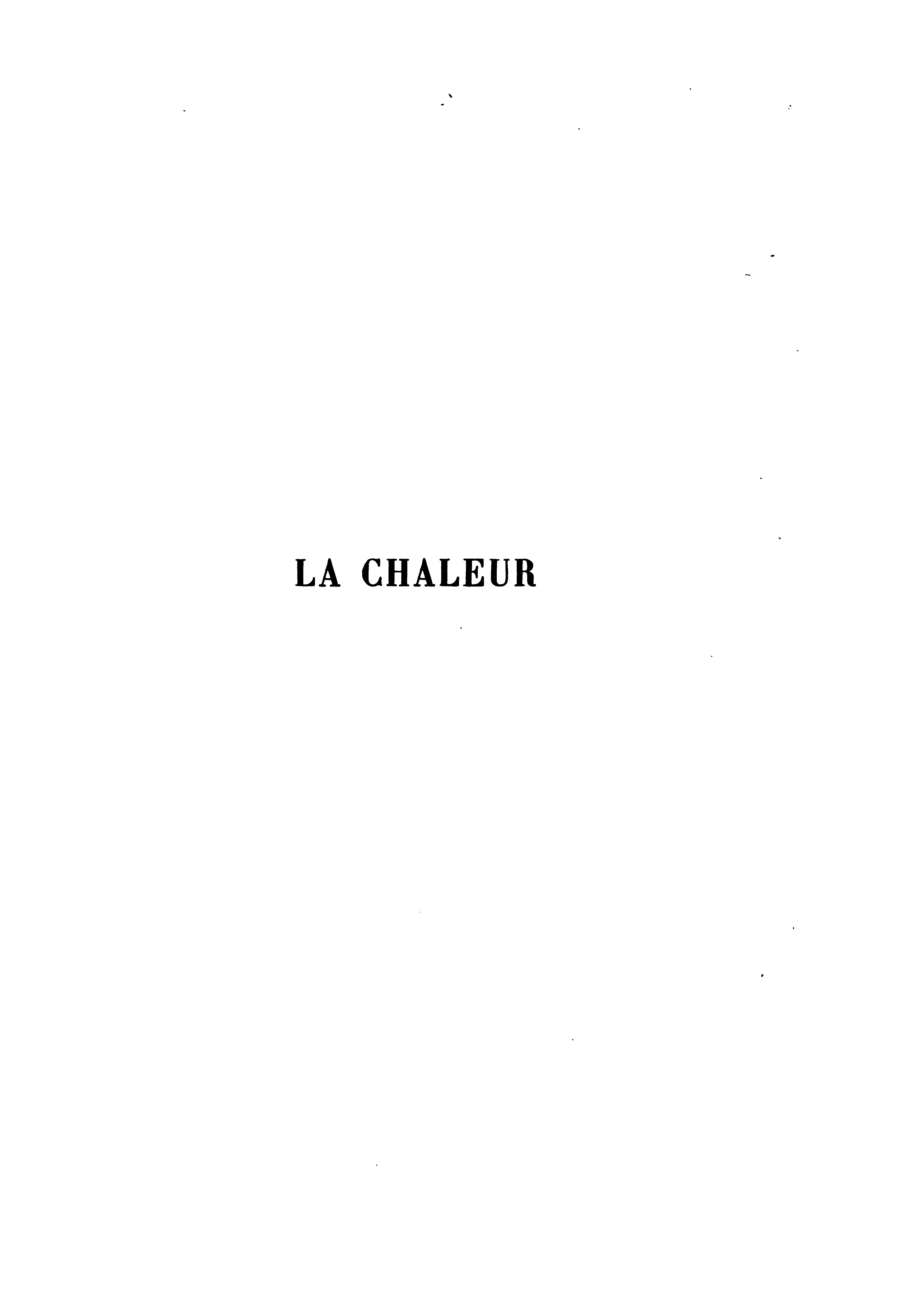
LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie

79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

—

1884





LA CHALEUR

LE

MONDE PHYSIQUE

LA CHALEUR

PREMIÈRE PARTIE

LES PHÉNOMÈNES ET LEURS LOIS

De toutes les forces physiques, la chaleur est celle dont il nous importe le plus de connaître et d'approfondir les lois. Non seulement elle intéresse directement, immédiatement, notre propre existence, ainsi que celle de tous les êtres dont la vie est indispensable à la nôtre, mais son action sur tous les corps, à des degrés d'ailleurs bien divers, est si constante, qu'on ne conçoit guère ce qu'ils seraient sans elle. « Aucun des phénomènes actuels, dit M. Dumas[1], ne peut nous donner une idée de ce que deviendrait la matière, si elle cessait d'être soumise à l'action de la chaleur, qui en agite les dernières particules. Nous apprécions l'existence de la chaleur sans matière, dans le vide parfait. La matière sans chaleur nous est inconnue. »

1. *Éloge historique de Faraday.*

Si cette assertion de l'illustre secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences est vraie pour les corps inorganiques quelconques, combien n'est-elle pas plus évidente pour tout être organisé! Privation non pas même de toute chaleur, mais seulement d'un certain degré de chaleur, est pour tout corps vivant, animal ou végétal, synonyme de mort.

Qu'on songe, en effet, à ce que deviendraient nos sociétés modernes, même les moins civilisées, notre industrie, nos arts, nos relations de toute nature avec la population entière du globe, si les mille opérations où la chaleur est employée artificiellement aujourd'hui devenaient impossibles, venaient à disparaître, soit par le manque des moyens matériels, soit par la perte du trésor des connaissances accumulées relatives à leur emploi. Nous ne parlons pas ici, bien entendu, de l'usage du feu dans les opérations domestiques les plus simples : il faut remonter à nos sauvages ancêtres de l'âge de la pierre, et même au delà, pour avoir une idée de la vie des premiers hommes, alors qu'ils n'avaient point appris encore à se procurer ou du moins à conserver le précieux élément. Qu'on se figure seulement le combustible venant à manquer dans les manufactures, dans les ateliers de toutes sortes, dans les usines métallurgiques, les hauts fourneaux, les forges, etc., etc.; qu'on imagine les machines à vapeur industrielles, locomotives ou marines, chômant tout à coup : quelle effroyable perturbation dans le monde entier! Et si ce chômage forcé venait à durer pendant seulement une génération, quelle rétrogradation dans le monde civilisé! quelle décadence!

Comment et dans quelle mesure la chaleur intervient-elle dans la constitution de la matière, soit dans les corps inertes, soit dans les corps organisés, quelles lois suivent ses variations et quelles en sont les conséquences, voilà donc un problème dont la solution s'impose au point de vue purement scientifique.

L'importance de la science de la Chaleur n'est pas moindre au point de vue pratique. Le fonctionnement de l'immense

organisme d'où dépendent aujourd'hui en grande partie et la production de la richesse et la puissance des nations modernes, repose principalement sur l'emploi de la chaleur et aussi dès lors sur l'étude raisonnée des phénomènes dont cet agent est la source; il implique donc la connaissance approfondie des lois qui les régissent. Cependant il y a deux siècles à peine que les premières observations un peu précises, que les premières expériences méthodiques relatives à ces phénomènes ont été instituées; c'est aussi à cette date si récente que remonte l'invention de l'instrument de mesure, dont l'absence rendait toute étude de la chaleur infructueuse, sinon impossible, du thermomètre gradué. Que savait-on auparavant de la chaleur, des effets qu'elle produit dans les corps, des changements de volume et d'état qui résultent de ses variations? Rien, ou presque rien : on n'avait sur tous ces points d'une si haute importance que des notions vagues, incohérentes, quelques données empiriques. Heureusement, comme il en est de fréquents exemples dans l'histoire des sciences, une invention toute pratique à l'origine, la découverte de la puissance de la vapeur et de son application comme force motrice, vint stimuler le zèle des physiciens. Il leur fallut résoudre maint problème dont la solution était indispensable au perfectionnement de la machine à feu, et c'est ainsi que la conception de deux ou trois chercheurs de génie fut le point de départ de toute une série de recherches purement scientifiques, dont les résultats formèrent les premiers linéaments d'une théorie physique de la chaleur. Aux Papin et aux Newcomen succédèrent ainsi les Watt, les Lavoisier et les Laplace, puis toute une pléiade d'illustres physiciens, où nous voyons briller les noms de Gay-Lussac, de Dulong, de Fourier, puis de Melloni, de Prévost, de Davy, de Regnault, de Magnus, etc. Grâce aux travaux de ces laborieux explorateurs, à la précision croissante de leurs expériences, à leurs savants et profonds calculs, les lois des phénomènes furent formulées, et une multitude de précieuses données expérimentales s'accumulèrent, au grand avantage des

applications pratiques, et aussi au bénéfice non moindre de la théorie. Toutefois, au commencement de ce siècle, dans la science de la Chaleur, comme dans la science de la Lumière, subsistait une grande lacune.

Une question fondamentale restait en effet à résoudre : quelle était la nature de la chaleur? Sur ce point, les physiciens restaient partagés entre deux hypothèses également admissibles, semblait-il, mais entre lesquelles il importait de se prononcer, si l'on voulait édifier une véritable théorie. Fallait-il voir dans cet agent une substance particulière, une matière subtile *sui generis*, le *calorique*, sorte de fluide qui pénètre dans les interstices des molécules des corps, s'y accumule, puis se répand au dehors, produisant par sa présence en quantité plus ou moins grande les élévations ou les abaissements de température, les changements d'états, etc.? Ou bien, comme la lumière, la chaleur est-elle due aux mouvements invisibles des molécules de la matière pondérable, mouvements se transmettant sous forme ondulatoire, par l'intermédiaire du milieu qui propage également les ondes lumineuses? C'est cette seconde hypothèse qui a définitivement triomphé : le calorique n'est plus, dans la science, qu'un mot, auquel ne correspond aucune réalité matérielle; la chaleur n'est pour les physiciens qu'un mode spécial de mouvement. Toute une théorie nouvelle est née de cette conception de la nature de la chaleur. Elle est basée sur ce principe, que si la chaleur produit du mouvement, réciproquement le mouvement engendre de la chaleur; qu'il y a toujours équivalence entre le travail mécanique et la chaleur dans la mesure précise où les deux modes de mouvement sont susceptibles de se transformer l'un dans l'autre. Des premières expériences de Rumford, des principes entrevus par Sadi-Carnot, peu à peu la théorie nouvelle a surgi, formulée d'abord avec netteté par Mayer, puis précisée et développée par les expériences et les calculs des Joule, des Clausius, des Mackorne-Rankine, des Hirn, des Thomson. La théorie mécanique de la chaleur, ou, pour lui donner sa dénomination scientifique

la *Thermodynamique*, est aujourd'hui constituée sur la double base du calcul mathématique et des vérifications expérimentales. Cette nouvelle branche ou plutôt cette application nouvelle de la mécanique rationnelle peut être considérée comme l'œuvre capitale du dix-neuvième siècle dans le domaine des sciences physico-mathématiques.

Quel que soit l'intérêt qui s'attache aux vues théoriques, nous n'oublierons pas cependant que leur principal mérite est de servir de lien aux faits. C'est donc aux faits, tels que nous les présentent les observations patientes des savants, leurs délicates et minutieuses expériences, que nous nous attacherons d'abord, ainsi que nous l'avons fait dans les trois premiers volumes de cet ouvrage. Ce n'est qu'après avoir donné, dans cette première partie, la description des phénomènes de la chaleur et l'exposé élémentaire des lois qui les régissent, que nous essayerons de présenter au lecteur une esquisse des principes sur lesquels repose la théorie mécanique de la chaleur et des expériences qui l'ont confirmée. D'ailleurs on n'attendra pas de nous une démonstration rigoureuse de ces principes, puisqu'elle exigerait des développements mathématiques qui nous feraient sortir de notre cadre et de notre programme. Mais nous nous attacherons aux faits qui justifient cette conception grandiose et aux importantes conséquences qui en découlent.

CHAPITRE PREMIER

LA CHALEUR DANS LA NATURE

§ 1. LA CHALEUR ET LE MOUVEMENT A LA SURFACE DU GLOBE TERRESTRE.

Le mouvement, à la surface de la Terre, paraît inséparable de la chaleur. On pourrait aisément, croyons-nous, généraliser cette assertion et l'étendre à tous les corps de l'univers. Mais nous n'avons en vue ici que les phénomènes de mouvement les plus immédiatement observables, et nous laisserons de côté la rotation de notre planète et son mouvement de translation, qui sont du domaine des faits cosmiques et ressortissent à l'astronomie.

Considérons d'abord les mouvements qu'on observe dans le monde inorganique, et montrons quelle dépendance étroite existe entre eux et la chaleur. Prenons en premier lieu ceux qui affectent les masses solides dont l'écorce terrestre est constituée. Dans leur ensemble, ces masses, disposées généralement, comme la géologie nous l'enseigne, en couches superposées et concentriques, paraissent en équilibre. Mais ce n'est là qu'une apparence : en réalité, loin d'être stable, cet équilibre est perpétuellement oscillant, par suite des mouvements intestins qui, des couches internes ou du noyau, se communiquent aux couches superficielles : tremblements de terre, éruptions volcaniques, soulèvements ou affaissements, les uns soudains, les autres d'une grande lenteur, ébranlent d'une façon pour ainsi dire continue le sol des continents et des îles comme

celui sur lequel reposent les masses liquides des océans et des mers. Dans son récent ouvrage sur *Les volcans et les tremblements de terre*, le professeur Fuchs, traitant de la question de la durée et de la fréquence de ces derniers phénomènes, constate que la statistique des tremblements de terre enregistrés par les savants ne se rapporte qu'à une faible partie de la surface terrestre. Néanmoins leur nombre et celui de leurs secousses sont assez grands[1] pour que ce savant arrive à une conclusion formulée en ces termes : « Il n'y a donc point de jours ni même d'heure sans tressaillements terrestres. On peut même soutenir sans exagération que la Terre est dans un état perpétuel d'ébranlement et de mouvement, soit sur un point, soit sur un autre de sa surface. » Diverses hypothèses ont été proposées pour expliquer les phénomènes volcaniques et les mouvements qui affectent la partie solide de l'écorce terrestre et ces hypothèses partagent encore les opinions des savants. Suivant les uns, le noyau de notre globe conserve encore aujourd'hui dans la plus grande partie de sa masse sa fluidité originelle; au-dessous de la croûte solidifiée, relativement mince, constituant le sol, se trouve une masse que sa haute température rend incandescente et maintient tout entière à l'état de fusion ignée. Les fluctuations accidentelles ou périodiques subies par cette masse liquide, les dégagements de gaz ou de vapeurs qui résultent de l'infiltration des eaux de la

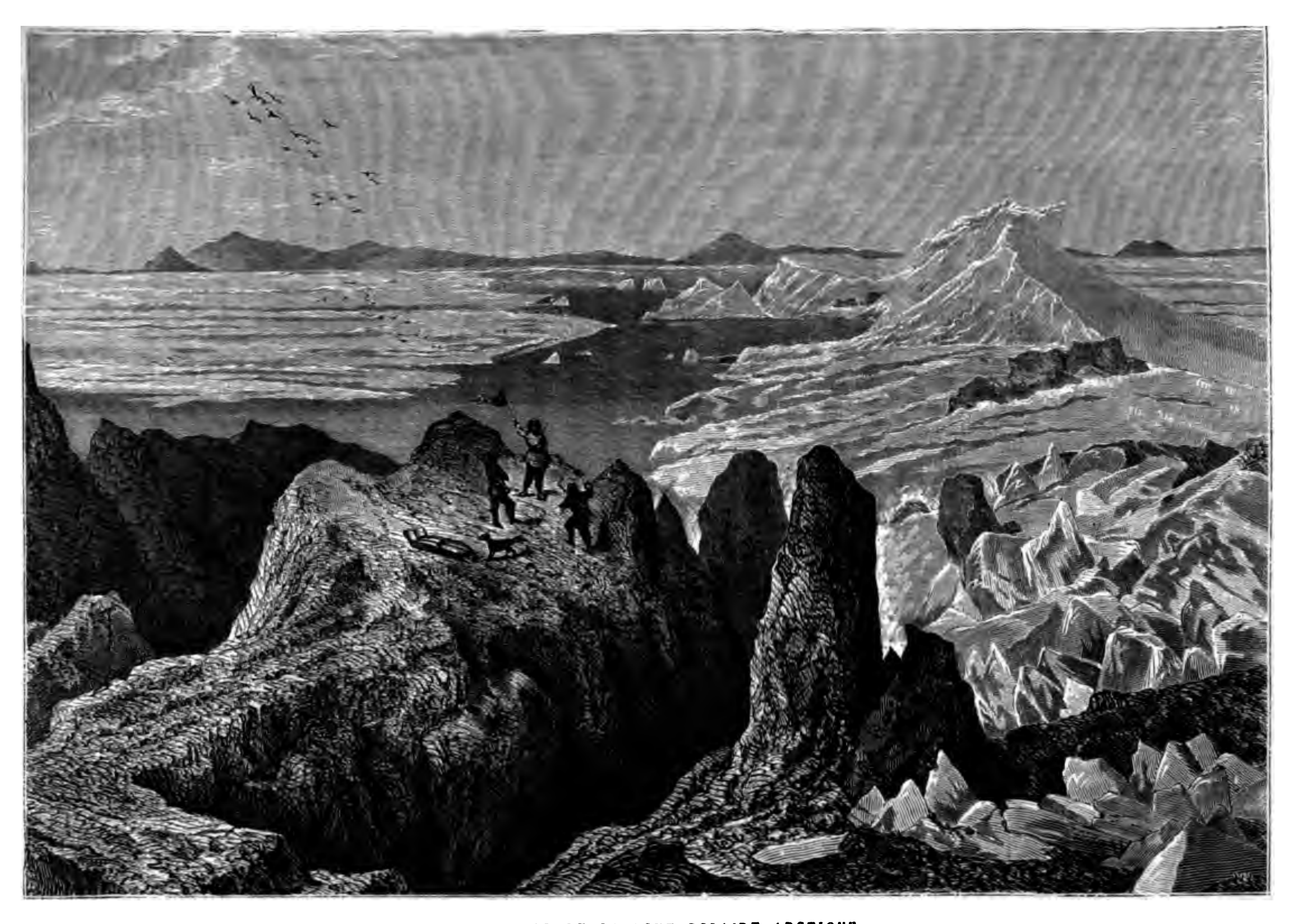
1. « De 1865 jusqu'à la fin de 1873, dit M. Fuchs, j'ai eu connaissance de 1184 tremblements de terre, qui se firent en 517 endroits différents. L'Allemagne (y compris l'Autriche allemande), qui compte parmi les pays les plus pauvres en tremblements de terre, présente pendant cette période 94 tremblements de terre en divers endroits.

» De ces 1184 tremblements de terre, quelques-uns ne comprennent qu'un seul choc; beaucoup durèrent plusieurs semaines ou plusieurs mois, et certains durèrent même plusieurs années. On a noté pour chaque jour particulier de cette période de neuf ans un ou plusieurs ébranlements. Du 1er au 6 mai 1870, la seule ville de Yokohama éprouva 123 chocs, et lorsque la ville de Batang, en Chine, fut détruite le 10 avril 1871, les secousses qui suivirent cette catastrophe durèrent presque sans interruption pendant dix jours, de façon que le sol était agité comme un vaisseau sur une mer houleuse. Pendant un de ces tremblements de terre qui dura plusieurs mois, en 1868, à l'île Hawaï, on compta, pendant le mois de mars seulement, 2000 secousses, et encore avait-on négligé de tenir compte des plus faibles. » (*Les volcans et les tremblements de terre*, 1 vol. de la Bibliothèque scientifique internationale.)

mer dans ces profondeurs, sont les causes des éruptions volcaniques et des tremblements de terre qui précèdent ou accompagnent ces éruptions. D'autres estiment que le noyau intérieur de la Terre est solidifié depuis longtemps, sinon entièrement, du moins sur une grande épaisseur; mais ils accordent, pour expliquer les laves vomies par les bouches des cratères, qu'il existe encore des couches incandescentes et fluides, des lacs ignés au-dessous de toutes les régions de nature volcanique. Qu'on adopte l'une ou l'autre de ces hypothèses, ou même qu'on se borne à invoquer les réactions chimiques subies par les matériaux des couches intérieures du globe, toujours est-il que c'est la chaleur qui est, pour les uns comme pour les autres, la cause déterminante des mouvements incessants dont l'écorce solide de notre planète est le siège.

Quant aux soulèvements et aux affaissements lents de ce même sol, aux mouvements qui en certains points abaissent le niveau des continents, en d'autres points le font s'exhausser progressivement au-dessus de l'océan, c'est à des contractions et à des dilatations intérieures qu'on les attribue, et par conséquent c'est encore à des variations de chaleur qu'on en doit faire remonter la cause.

Si, de l'écorce solide du globe, nous passons à la partie fluide, aux océans et aux mers, puis à l'enveloppe atmosphérique, nous ne constatons plus seulement des mouvements accidentels, des secousses ou des convulsions se succédant à des intervalles plus ou moins rapprochés, distincts toutefois, mais une mobilité perpétuelle. Les masses profondes des eaux aussi bien que les couches de l'air sont dans un état continuel d'agitation, se divisant en courants plus ou moins réguliers ou permanents, plus ou moins variables dans leur intensité ou leur direction : ce sont les fluctuations incessantes de ces courants qui font des études météorologiques une science si délicate et si difficile. D'autre part, à la surface même des terres, sur les continents et les îles, les vapeurs suspendues dans l'atmosphère sous forme de nuages, déversées par les pluies ou condensées



UN PAYSAGE DE LA ZONE POLAIRE ARCTIQUE.

Le cap Fligely, d'après le lieutenant J. Payer.

en neiges sur les sommets, sont l'origine de ces innombrables cours d'eau, ruisseaux, rivières et fleuves, qui suivent la pente des terrains, les inclinaisons des versants en obéissant à la pesanteur, pour rassembler leurs eaux et finalement les reporter au réservoir commun : la mer. Or, si la gravité est la force qui précipite les eaux, préside à leur écoulement, en un mot produit le mouvement en vertu duquel elles se rapprochent de la surface du sol, si c'est à la même force que sont dus les mouvements d'ascension ou de précipitation des fluides aériformes, c'est une autre force, la chaleur, qui rompt sans cesse l'équilibre tendant à s'établir, c'est elle qui est l'origine des courants océaniques, la cause de la circulation perpétuelle dont les profondeurs de l'océan comme les régions élevées de l'air sont le théâtre.

L'inégalité de température des contrées voisines de l'équateur et des régions voisines des pôles, sous l'influence de la radiation solaire, produit un appel constant des couches d'air froides des pôles vers l'équateur, par le fait de la raréfaction et de l'ascension des masses d'air échauffées des zones tropicales, déterminant ainsi un courant inverse de l'équateur aux pôles ; ces vents généraux et dominants éprouvent des perturbations locales, dont l'origine est due pareillement aux inégalités de la température provenant de circonstances diverses. De même l'action des rayons solaires sur les eaux des mers provoque la formation de vapeurs qui, mêlées à l'air, sont transportées tantôt à l'état de vapeur invisible, tantôt à l'état de nuages, selon le degré de saturation des couches aériennes. Que, par le fait d'un refroidissement local, résultant le plus souvent de l'ascension graduelle des masses d'air venues de l'océan, la condensation de ces vapeurs dépasse une limite qui dépend elle-même de la température, et la précipitation a lieu sous forme de pluie ou de neige. Ainsi se renouvelle sans cesse l'eau des sources, des rivières et des fleuves, qui, selon l'expression de Clausius, « forment la moitié d'un cours circulaire dont la seconde moitié se trouve dans les nuages ».

Nous étudierons plus tard, avec les développements nécessaires, les mouvements de l'atmosphère et des mers, que nous ne faisons ici que constater, n'ayant en ce moment d'autre intention que de montrer leur relation avec la chaleur.

Mais il est aisé de voir que cette relation est plus étroite encore que nous ne venons de le dire. En effet, la mobilité que nous voyons être une propriété particulière des corps lorsqu'ils prennent l'état liquide ou l'état gazeux, disparaît à peu près complètement dès que, par un abaissement suffisant de température, ils affectent l'état solide. Un certain degré de chaleur est nécessaire pour que le mouvement des molécules puisse s'effectuer librement, comme on le voit dans les liquides ; un degré encore plus élevé transforme ceux-ci en gaz ou en vapeurs, dont les molécules sont d'elles-mêmes en perpétuel mouvement. Qu'on suppose donc que la Terre entière, des pôles à l'équateur, soit soumise à la basse température qui règne dans les régions polaires pendant leurs longues nuits hivernales. A l'agitation actuelle, aux courants de l'océan et de l'air qui existent aujourd'hui, va succéder une immobilité presque absolue. Un froid encore plus intense, celui par exemple qui règne au delà des limites de l'atmosphère ou dans les espaces célestes[1], congèlerait toute la masse des eaux de la mer, toutes les vapeurs de l'atmosphère, qui, faisant alors partie intégrante de l'écorce solide du globe, participeraient à son immobilité.

Nous avons cité dans notre premier volume un passage d'un intéressant mémoire de Lavoisier[2] où cette hypothèse des variations de la température du globe terrestre est développée, et nous reproduisons ici ce qui a trait aux conséquences d'une extrême diminution de chaleur : « Si la Terre, dit-il, se trouvait tout à coup placée dans des régions très froides, par exemple de Jupiter et de Saturne, l'eau qui forme aujourd'hui

1. D'après les calculs de Pouillet, la température de l'espace est d'environ 142 degrés au-dessous de celle de la glace ou de zéro.

2. *Vues générales sur la formation et la constitution de l'atmosphère de la Terre*, tome II des *Œuvres complètes* de Lavoisier.

nos fleuves et nos mers, et probablement le plus grand nombre des liquides que nous connaissons, se transformerait en montagnes solides, en rochers très durs, d'abord diaphanes, homogènes et blancs, comme le cristal de roche, mais qui, avec le temps, se mêlant avec des substances de différentes natures, deviendraient des pierres opaques diversement colorées. Dans cette supposition, l'air ou au moins une partie des substances aériformes qui le composent, cesserait sans doute d'exister dans l'état de fluide invisible, faute d'un degré de chaleur suffisant; il reviendrait donc à l'état de liquidité, et ce changement produirait de nouveaux liquides dont nous n'avons aucune idée. »

Au temps où Lavoisier faisait ces conjectures, tous les gaz n'avaient pu encore être liquéfiés. Aujourd'hui l'expérience a justifié ces prévisions hardies. L'acide carbonique, l'oxygène, l'hydrogène, à des températures extrêmement basses et sous des pressions considérables, ont été liquéfiés et même en partie solidifiés. On peut donc hardiment supposer un abaissement de température assez grand pour que la Terre entière ne soit plus qu'un bloc solide sans atmosphère et sans mers, à la surface duquel tout mouvement visible aurait cessé. De sorte que, si la chaleur interne du noyau venait également à disparaître, notre planète ne conserverait plus, de tous les mouvements qui en agitent les diverses parties, que sa rotation et sa translation circumsolaire[1]. A sa surface, comme à

1. Une telle hypothèse semble réalisée dans un corps céleste qui tient à la Terre par un lien étroit. Tout fait croire que la Lune est à la fois privée d'atmosphère et d'eau. S'il reste encore des doutes sur la parfaite immobilité qui règnerait à sa surface, s'il est possible que de temps à autre des changements s'effectuent dans son sol, comme divers observateurs ont cru le remarquer il y a quelques années, toujours est-il que ces changements auraient une cause non pas extérieure, mais interne : les réactions du noyau sur l'écorce. Mais la privation d'eau et d'air ne peut être ici attribuée à l'absence de chaleur.

Nous n'avons rien dit du mouvement des masses océaniques qui constitue les marées terrestres, la cause en étant due à l'action de la gravité de la Lune et du Soleil. Mais il est clair qu'avec la solidification des eaux, qu'occasionnerait le froid intense dont nous avons parlé, l'oscillation semi-diurne cesserait d'exister, de sorte que ce mouvement est aussi sous la dépendance de la chaleur et cesserait dès que le froid deviendrait assez intense pour congeler les eaux de l'Océan. C'est ce que reconnait Delaunay dans son étude sur le ralentissement du mouvement de rotation de la Terre.

son intérieur, règnerait l'immobilité absolue. Les flux périodiques ou sporadiques des météores d'origine cosmique, bolides, étoiles filantes, seraient les seuls mouvements visibles à la surface de notre planète. Encore faut-il ajouter que ce bombardement n'offrirait plus alors le spectacle varié des globes de feu ou des fusées étincelantes dont le ciel de nos nuits est si fréquemment parsemé, puisque la lumière des météores est due uniquement à la transformation en chaleur de la force vive dont ils sont animés, sous l'influence de la résistance opposée par l'air à leur mouvement.

§ 2. LA CHALEUR ET LA VIE A LA SURFACE DE LA TERRE.

On vient de voir quel rôle la chaleur et ses variations jouent dans les mouvements des corps inorganiques; son influence n'est pas moindre sur le monde des corps organisés ou vivants. Tout le monde sait que les végétaux, comme les animaux, pour vivre, croître, se développer, ont besoin d'une certaine quantité de chaleur; quand la température du milieu où ils sont plongés n'est pas comprise entre des limites déterminées, variables selon les espèces, les fonctions vitales sont impossibles, le végétal ou l'animal périt. De plus, certaines de ces fonctions sont elles-mêmes productrices de chaleur, comme certaines autres en consomment ou en absorbent. Les conditions de cette action réciproque de la chaleur et de la vie sont plus ou moins complexes, selon le degré de complexité de l'organisme lui-même. Pour en donner dès maintenant un aperçu, citons quelques passages empruntés à l'ouvrage remarquable qu'a publié sur ce sujet le savant professeur qui occupe la chaire de Physique à la Faculté de médecine de Paris, M. Gavarret :

« Depuis l'animal le plus haut placé dans l'échelle zoologique jusqu'au dernier zoophyte, depuis la plante la plus parfaite jusqu'au végétal le plus simple, l'être vivant, pris dans les conditions physiologiques normales de son existence

et de son développement, et protégé contre l'action réfrigérante de l'évaporation, se montre, partout et toujours, doué d'une température supérieure à celle de l'air ou de l'eau qui l'entoure. La production de chaleur est le fait le plus général et le plus constant de la vie. Mais la vie ne se maintient qu'à la condition d'une action continuelle et réciproque du milieu ambiant et de l'être organisé l'un sur l'autre. C'est dans l'étude de ces rapports nécessaires et incessants de l'être vivant avec



Fig. 1. — La végétation dans la zone tempérée; vue prise dans la vallée de Yosemiti.

tout ce qui l'entoure que nous avons dû chercher, et que nous avons trouvé, la cause réelle de cette production de chaleur si remarquable et si bien démontrée.

« L'animal emprunte de l'oxygène au milieu ambiant, et brûle les matériaux organiques que la digestion verse dans son sang. Ces combustions lentes, complètes ou incomplètes, dont les produits sont éliminés par les voies respiratoires, la peau et les divers émonctoires de l'économie, lui fournissent toute la chaleur nécessaire pour maintenir sa température.

« Les graines et les fleurs prennent place à côté des animaux. Comme eux, elles absorbent de l'oxygène, brûlent des matières organiques, et produisent de la chaleur.

« Du moment où commence, et tant que dure le mouvement de végétation, la plante puise, dans la terre par ses racines et dans l'air par ses feuilles, de l'eau, des sels, de l'ammoniaque et de l'acide carbonique. Avec ces éléments *minéraux* elle fabrique, de toutes pièces, les matières *organiques* nécessaires à son développement, et destinées à former ultérieurement la base de l'alimentation des animaux. Ce travail d'association d'éléments minéraux, empruntés au sol et à l'atmosphère, a pour but et pour résultat la production de la *molécule organique;* les parties vertes des végétaux ne possèdent pas d'autre source de chaleur[1]. »

Il ne s'agit là que de la chaleur propre aux êtres vivants, c'est-à-dire de la chaleur développée ou consommée au sein de leur organisme; mais une relation non moins étroite lie leur existence à la température du milieu ambiant. Chez les animaux supérieurs ou inférieurs, comme chez les plantes, la température interne est toujours en excès sur celle de ce milieu, et cet excès varie considérablement d'une espèce à l'autre; mais l'influence exercée par la chaleur externe sur les phénomènes de la vie végétale ou animale n'a pas moins d'importance que la chaleur propre à l'organisme, car c'est d'elle que dépend, en grande partie du moins, la distribution des êtres vivants à la surface du globe, la plus ou moins grande richesse ou la plus ou moins grande variété des flores et des faunes. Il est vrai que la chaleur n'est pas alors le seul agent physique qui intervienne dans cette distribution; la lumière a sa part d'influence, ou, ce qui revient au même, la chaleur agit diversement selon qu'elle est ou non accompagnée de lumière; l'eau exerce une action notable, et la chaleur humide produit des effets bien différents, souvent opposés, à ceux de la chaleur sèche. Écoutons ce que

1. *De la chaleur produite par les êtres vivants*, par J. Gavarret. Paris, 1855.



LA VÉGÉTATION DANS LA ZONE TROPICALE.


THE ASTOR LIBRARY
NY

dit sur tous ces points, en ce qui concerne les plantes, un physicien naturaliste que nous avons eu plusieurs fois déjà l'occasion de citer :

« La végétation de chaque espèce, dit M. Ch. Martins, correspond à une section déterminée de l'échelle thermométrique. Au-dessous d'un certain degré de froid, la plante périt : elle meurt également si le thermomètre dépasse un certain degré de chaleur ; elle ne prospère qu'entre des limites de température fixes et invariables. Cette échelle thermométrique est loin d'être la même pour toutes les plantes : le règne végétal présente à cet égard des diversités infinies. Le mélèze, le bouleau nain supportent des froids de 40 degrés au-dessous de zéro, qui congèlent le mercure, tandis qu'un grand nombre de palmiers, d'orchidées tropicales ou de fougères arborescentes succombent lorsque le thermomètre marque encore 10 degrés au-dessus de zéro. Il est des plantes qui vivent couchées sur le sable des déserts d'Afrique, dont la chaleur atteint souvent de 60 à 80 degrés centigrades, tandis que les plantes alpines ou boréales se flétrissent si le thermomètre se soutient pendant quelques jours à 10 degrés au-dessus de zéro. Il est cependant encore un point thermométrique important à considérer : c'est celui où chaque espèce commence à entrer en végétation. Une plante, en effet, peut supporter un froid de 15 degrés au-dessous de zéro et ne donner signe de vie que lorsque le thermomètre en marque 6 au-dessus. Il n'est pas d'ami des montagnes qui n'ait vu avec ravissement les saxifrages et les soldanelles en fleur baignées par l'eau ruisselant des champs de neiges éternelles qui blanchissent les Alpes : cette eau a une température supérieure à zéro de quelques dixièmes seulement, et celle de l'air ne dépasse pas 5 ou 6 degrés. J'ai même vu la soldanelle cachée sous des voûtes de neige fermées de toutes parts. Dans ces cavités, la température de l'air et celle de l'eau sont nécessairement à zéro : cette basse température est cependant suffisante pour faire germer et fleurir la soldanelle. D'un autre côté, les [illegible]

tiers et les végétaux de la zone torride sont insensibles aux températures qui n'atteignent pas 15 ou 20 degrés. Tous les printemps nous avons la preuve de ces vérités longtemps méconnues. Nous voyons les plantes de nos jardins entrer successivement en végétation à mesure que le thermomètre s'élève au degré où la chaleur agit efficacement sur leur vitalité. Chaque espèce a donc son thermomètre particulier, dont le zéro correspond à la température la plus basse à laquelle sa végétation est encore possible. Ce zéro est toujours supérieur à celui de nos thermomètres, qui correspond à la température de la glace fondante [1]. »

La chaleur est un élément si essentiel à la vie des végétaux comme à celle des animaux, que rien n'est plus difficile que de naturaliser dans une contrée une espèce animale ou végétale provenant d'une autre contrée : entre autres conditions de réussite, celle de l'identité des extrêmes de la température dans les climats des deux contrées est absolue. Si elle n'est point satisfaite, la naturalisation est toujours précaire et subordonnée au secours et aux soins de l'homme. Aussi, comme le dit M. Martins, « rien de plus rare que les naturalisations complètes. » Il ajoute avec non moins de raison : « Non content de naturaliser les plantes et les animaux utiles, l'homme a prétendu les acclimater. Il s'est flatté de l'espoir qu'un végétal provenant d'un pays chaud s'habituerait peu à peu à un climat plus rigoureux; il a cru que la graine récoltée sur l'individu cultivé dans sa nouvelle patrie donnerait des sujets plus robustes. Douce chimère! comme l'a dit Dupetit-Thouars. Le végétal vit tant que le thermomètre et l'hygromètre se maintiennent dans les limites qu'il peut supporter; cette limite dépassée, il périt. Chaque hiver rigoureux est pour les horticulteurs passionnés une source d'amères déceptions. L'arbre qu'on croyait acclimaté, parce qu'il avait traversé plusieurs hivers semblables à ceux de son pays, meurt dès que le ther-

1. *Du Spitzberg au Sahara; la Géographie botanique et ses progrès les plus récents.* Paris, 1866.

momètre s'abaisse au-dessous du minimum de son climat natal. Les grands hivers de 1709, 1789, 1820 et 1830 (on peut ajouter aujourd'hui et de 1879) ont tué des arbres que nous sommes habitués à considérer comme indigènes, tels que les noyers, les châtaigniers et les mûriers. Tous les vingt ans les oliviers de la Provence et les orangers de la Ligurie meurent de froid sur un point ou sur un autre. Leur mort nous rappelle que dans les contrées d'où ils proviennent, le mercure ne descend jamais au-dessous du point de congélation. Ce que j'ai dit des végétaux est également vrai des animaux : leur acclimatation est une chimère. Chaque espèce vit et se reproduit dans certaines conditions de température et d'alimentation ; en dehors de ces conditions, elle meurt[1]. »

Si un certain degré de chaleur est nécessaire pour que la plante entre en végétation, il faut une somme déterminée du même agent pour produire l'épanouissement de ses fleurs et la maturation de ses fruits. Mais il ne faut pas oublier ici que la température ne suffit pas ; l'élément le plus actif est la lumière ou, pour parler plus exactement, la chaleur lumineuse.

Si l'on veut se rendre compte de l'influence que les radiations lumineuses et calorifiques exercent sur le développement et la vie des végétaux, sur le développement et la vie des animaux, il n'est pas besoin de suivre dans leurs détails les analyses des physiologistes qui ont étudié la question. Les conclusions qui en résultent ne sont-elles pas écrites en traits frappants, visibles et palpables, dans les flores et les faunes des divers climats ? Le voyageur qui parcourt, dans l'ancien comme dans le nouveau Monde, les zones successives comprises entre l'équateur et les pôles, ou seulement entre les tropiques et les cercles polaires, voit se dérouler sous ses yeux des paysages si caractéristiques, qu'il peut se rendre compte, au seul aspect de la végétation, du degré de latitude ou d'altitude auquel il se trouve. La nature vivante, sous sa double manifes-

1. Ch. Martins, *loc. cit.*

tation de vie végétale et de vie animale, passe par des nuances insensibles qui affectent à la fois les espèces, et dans chaque espèce les dimensions, le port, etc., du sol glacé des régions arctiques, à peine recouvert d'un maigre lichen, aux luxuriantes forêts vierges des tropiques (voy. fig. 1, pl. I et pl. II).

La science qui a reconstitué, par l'étude approfondie des terrains de sédiment, les flores et les faunes des époques géologiques, nous apprend que, dans le passé de la Terre, pendant ces périodes que des millions d'années séparent de la nôtre, la chaleur a joué un rôle plus important encore qu'aujourd'hui sur les productions des deux règnes. Toutefois il importe de remarquer, comme nous l'avons fait déjà, que dans des phénomènes aussi complexes que ceux dont les êtres organisés nous offrent le tableau, la chaleur n'est pas le seul agent physique essentiel à leur développement normal. Mais à coup sûr, partout où il y a vie, on peut être assuré qu'il y a, à la fois, production et consommation de chaleur.

L'astronomie, la physique du globe, la géologie concourent à démontrer que, pendant cette longue histoire du développement de notre planète, les climats ont subi sur toute la surface du globe des changements considérables. Les végétaux qui caractérisent les premières périodes, les plus chaudes, celles de la houille et de la craie, appartiennent à des familles cryptogames; leurs dimensions gigantesques indiquent une puissance de végétation dont il ne reste plus de trace que dans quelques rares points de notre zone tropicale. Peu à peu, à mesure que la température terrestre se refroidit, le caractère de la végétation change ; des arbres semblables à ceux de l'époque actuelle se mêlent aux formes primitives, puis vont en augmentant en nombre à mesure qu'on approche des deux premières périodes tertiaires correspondant aux terrains des environs de Paris. « A cette époque, dit M. Ch. Martins, la végétation est complètement changée; les végétaux primitifs auxquels nous devons la houille ont disparu; le paysage a l'aspect de celui des pays chauds et des zones tempérées.

IV



FLORE DE L'ÉPOQUE SECONDAIRE

pendant la période crétacée (terrain cénomanien), d'après M. de Saporta.

Les arbres ressemblent à des saules, à des pins, à des palmiers. Enfin, dans la période tertiaire la plus récente, ce sont des arbres voisins de nos acacias, de nos érables, de nos peupliers, qui ombragent le sol ; c'est l'aurore de la végétation actuelle, de celle qui doit orner la terre à l'apparition de l'homme. Les arbres du Japon, les forêts de l'Amérique septentrionale, rappellent le mieux cette période végétale, et semblent relier ainsi la flore actuelle à la dernière des flores disparues. » Quelle durée représentent tous ces changements ! Combien de milliers, de millions d'années ont été nécessaires à l'entier accomplissement de ces phénomènes connexes, du lent refroidissement de la température de la Terre et des transformations subies par les espèces animales et végétales ! Quand on songe au nombre de siècles qui s'écoulent sans amener chez ces espèces de modifications sensibles, l'imagination s'étonne en face de l'antiquité de la Terre, devant laquelle l'antiquité historique n'est qu'un point imperceptible de la durée !

§ 3. LA CHALEUR ET SES APPLICATIONS INDUSTRIELLES.

A l'origine, il est bien probable que l'homme, comme les autres animaux, se bornait à profiter de la chaleur naturelle que le Soleil rayonne sur la Terre, et qui produit les aliments indispensables à l'entretien de la vie. Peu à peu l'expérience lui apprit à se prémunir contre le froid et les autres intempéries en se couvrant le corps de la peau des animaux qu'il avait tués. Les cavernes lui servirent dans le même but, jusqu'à ce que, à l'aide des outils en silex qu'il s'était façonnés, il put, en taillant et coupant le bois, se construire avec les branches et les feuilles des arbres des abris protecteurs. Connut-il dès l'origine le feu et ses usages ? C'est une question controversée. Darwin, après avoir énuméré les progrès réalisés par les premiers ancêtres de l'homme, dit : « Il a découvert l'art de faire le feu, à l'aide duquel il a pu rendre digestibles des racines

dures et filandreuses, et innocentes par la cuisson, des plantes vénéneuses à l'état cru. Cette dernière découverte, la plus grande, sans contredit, après celle du langage, a précédé la première aurore de l'histoire[1]. » D'après sir John Lubbock, « on ne peut admettre comme suffisamment prouvé ni qu'il existe actuellement, ni qu'il y ait eu, à une époque historique, une race d'hommes ne connaissant pas le feu. Ce qui est certain, c'est qu'en remontant aux plus anciens villages lacustres de la Suisse, et aux amas de coquillages du Danemark, on trouve que l'usage du feu était bien connu en Europe[2]. » Les Troglodytes de la Lozère, si bien décrits par notre savant et regretté Broca, connaissaient également l'usage du feu. Mais le degré de culture de ces peuplades, dont les unes appartenaient à l'âge de la pierre, les autres à celui du bronze, était déjà relativement fort avancé; comme le dit fort bien Darwin, il s'agit d'âges qui ont précédé « la première aurore de l'histoire ». Quoi qu'il en soit, deux sortes de phénomènes ont pu donner à l'homme ce précieux agent de toute civilisation, le feu : la foudre, en allumant dans les forêts les amas de branchages, de feuilles desséchées par l'ardeur des rayons solaires; les volcans, en vomissant sur leurs flancs des torrents de lave, qui non seulement déterminaient des incendies au moment de l'éruption, mais encore conservaient leur haute température pendant des mois et même des années. Quant à la production artificielle du feu, elle ne fut découverte probablement que beaucoup plus tard. Ce qui prouve combien cet art, qui nous semble si simple, fut à l'origine chose difficile, c'est le soin que les plus anciens peuples prenaient à le conserver. « Le culte du feu, dit sir John Lubbock, est si répandu, qu'on peut le regarder comme universel. Depuis l'invention des allumettes, nous pouvons à peine nous faire une idée de la difficulté qu'éprouve un sauvage à se procurer du feu, surtout quand le temps est humide. On dit cependant que, tout récem-

1. *La descendance de l'homme et la sélection naturelle*, trad. E. Barbier, p. 48.
2. *L'homme préhistorique*, trad. E. Barbier, p. 512.

ment encore, quelques tribus australiennes ne savaient pas s'en procurer, et que si leur feu s'éteignait, ils faisaient des voyages considérables pour aller emprunter un tison à une autre tribu. Aussi dans le monde entier trouvons-nous la coutume établie de déléguer une ou plusieurs personnes dont le seul devoir consiste à entretenir continuellement le feu. De là, sans aucun doute, l'origine des Vestales; de là aussi provient l'idée toute naturelle de la sainteté du feu[1]. »

Une fois en possession du feu, et quand une longue expérience, peut-être aussi d'heureux hasards lui eurent appris à extraire les métaux du sein de la terre, à les fondre, à les forger et façonner, à substituer ainsi le bronze, puis le fer à la pierre qui lui servait à la fois d'arme et d'outil, l'homme sortit lentement d'abord des périodes de barbarie et de sauvagerie des premiers âges, pour entrer dans celle de la civilisation. Mais des milliers d'années, de siècles peut-être, furent nécessaires à ces transformations qui l'ont amené au seuil des temps historiques. Depuis lors même, quels progrès réalisés par le seul fait du développement de cette industrie primitive, quel chemin parcouru depuis l'antiquité jusqu'à nous! Quand enfin on récapitule tous les services que rend aujourd'hui aux sociétés modernes la production artificielle de la chaleur, on est tenté d'en comparer l'importance à ceux que nous recevons gratuitement de la chaleur du Soleil, dont tous nos foyers cependant ne forment, ainsi que nous le verrons plus tard, qu'une fraction bien infime. L'industrie emploie et utilise directement la chaleur dans les hauts fourneaux, les usines métallurgiques, les verreries, les fabriques de produits chimiques, etc., pour toutes les opérations en un mot qui exigent une température élevée. Dans un nombre toujours croissant d'ateliers, de manufactures, c'est la chaleur employée comme source de force motrice ou de travail mécanique qui tend à remplacer les forces jusqu'alors utilisées, trop peu régulières ou trop

1. *Les origines de la civilisation*, trad. E. Barbier, p. 309.

coûteuses, augmentant aussi dans une proportion considérable la somme de travail que l'homme pourrait tirer de ses bras seuls; c'est encore la chaleur qui a permis de centupler l'activité de la grande industrie des transports sur terre et sur mer, qui anime les innombrables foyers des locomotives et des bateaux à vapeur; c'est grâce à elle que les trains roulent jour et nuit sur les rails des voies ferrées, ou que les steamers sillonnent les flots de l'Océan.

Pour alimenter tous ces foyers de chaleur, pour satisfaire à cette dépense prodigieuse de combustible, les végétaux actuels n'auraient pu suffire, et tout le monde sait que c'est grâce aux réserves accumulées des végétations des âges primitifs qu'une telle consommation a pu s'accroître et augmente encore incessamment. Peut-être un temps viendra-t-il, plus prochain qu'on ne pense, où, les houillères épuisées, l'homme aura dû trouver une source nouvelle de chaleur, sous peine de voir la production industrielle, et avec elle la civilisation dans ses conditions actuelles d'existence, diminuer progressivement et s'éteindre. Cette perspective, en tout cas, suffit à témoigner de la haute importance qui s'attache, pour notre espèce, à la connaissance rigoureuse, approfondie, des lois régissant les phénomènes de la chaleur, connaissance qui nous révèlera peut-être un jour de nouveaux moyens de production du précieux agent.

§ 4. LE CHAUD ET LE FROID. — LE SENS DE LA TEMPÉRATURE.

L'impression que la chaleur cause sur nos organes est, comme celle de la lumière, un phénomène tout subjectif, qui ne nous renseigne en rien sur la nature de l'agent physique en activité. Le jugement que nous portons lorsque nous disons qu'un corps est *chaud* ou *froid* est tout relatif et dépend, comme nous le montre une expérience de tous les jours, autant de la disposition particulière de nos organes que de l'état du corps lui-même; et du reste, il peut arriver qu'il ne

nous donne, au point de vue de la chaleur, aucune sensation, en un mot qu'il ne nous semble ni froid ni chaud.

Le même corps, quand nous le touchons à des instants différents, peut aussi produire en nous des sensations différentes et même opposées, soit parce qu'il s'est réellement dans l'intervalle échauffé ou refroidi, soit que nos organes aient subi eux-mêmes des modifications analogues, soit enfin que les deux causes dont il s'agit ici aient simultanément contribué à cette différence d'impressions. Tout le monde trouvera aisément des exemples de l'influence de ces deux causes ; tout le monde aussi comprendra combien il serait difficile d'apprécier les variations de la chaleur dans les corps, si l'on n'avait pour base de cette appréciation que les sensations toutes personnelles produites au contact ou à distance. Supposons, par exemple, que nous maintenions pendant quelque temps notre main droite dans un vase d'eau froide, et notre main gauche dans de l'eau très chaude, puis que nous les plongions ensuite toutes deux à la fois dans un troisième vase plein d'eau tiède : nous éprouverons simultanément deux sensations opposées, l'une de chaleur, l'autre de froid, provenant l'une et l'autre cependant du même corps au même état.

Autre exemple de la difficulté que nous signalons : l'air extérieur nous paraît froid si nous sortons d'une chambre chaude ; au contraire, le même air nous semble chaud quand nous venons d'une cave fraîche. Qui de nous, entrant par un temps de gelée dans un appartement bien chauffé, ne s'écrie que la chaleur est étouffante? et cependant si, dans la saison des chaleurs, l'air vient à se refroidir subitement, sans descendre toutefois au-dessous du degré qui nous paraissait insupportable six mois plus tôt, nous grelottons par la même température qui alors nous semblait excessive. C'est que nos organes, progressivement habitués au froid ou à la chaleur, se font au contraire difficilement aux brusques transitions qui déterminent en eux des sensations beaucoup plus vives.

Enfin, des corps de nature diverse, placés dans une même

enceinte maintenue à une température constante, prennent eux-mêmes, nous le verrons, après un certain temps la même température : physiquement, ils sont également chauds ou également froids, comme on voudra. Cependant, si les uns sont du métal, du marbre, du verre, les autres du bois, de la laine, du papier, nous éprouverons en les touchant successivement des impressions bien différentes : le marbre et le fer nous paraîtront froids, l'étoffe de laine sera chaude, le bois, le papier ne sembleront ni froids ni chauds. En un mot, la sensation variera avec la nature du corps et l'état de sa surface. Ces notions sur la relativité des sensations de chaud et de froid, qui nous sont aujourd'hui familières, ont été longtemps méconnues. Sans remonter aux Anciens, qui, opposant la chaleur au froid comme des éléments contraires, voyaient dans le froid « une qualité ou accident, qui réunit et rassemble indifféremment les choses homogènes et les choses hétérogènes, tandis que le caractère distinctif de la chaleur est de rassembler les choses homogènes et de désunir les hétérogènes », nous voyons encore des savants du dix-septième siècle, comme Gassendi, partager les idées d'Épicure, de Lucrèce, distinguant le froid du chaud comme des propriétés de corpuscules spéciaux. Les atomes frigorifiques différaient pour eux des atomes ignés par leur nature et leur configuration. Ce n'est guère qu'au dernier siècle[1] qu'on parvint à se faire sur la chaleur et sur le froid

1. « Selon la plupart des physiciens modernes, le *froid* en général n'est qu'une moindre chaleur. Ce n'est dans les corps qu'une propriété purement relative ; un corps qui possède un certain degré de chaleur est *froid* par rapport à tous les autres corps plus chauds que lui ; et il est chaud, si on le compare à des corps dont le degré de chaleur soit inférieur au sien. Les glaces d'Italie sont *froides* comparées à de l'eau dans son état ordinaire de liquidité ; mais par rapport aux glaces du Groenland elles sont chaudes ; l'eau bouillante est *froide* relativement au fer fondu. Suivant cette idée, nul corps, s'il n'est privé de toute chaleur, ne saurait être absolument *froid*. « Nous appelons *froids*, dit M. 'S Gravesande, les corps moins chauds que les parties de notre corps auxquelles ils sont appliqués, et qui par cela même diminuent la chaleur de ces parties, comme nous nommons *chauds* ceux qui augmentent cette chaleur. A notre égard, le froid n'est que le sentiment qu'excite en nous la diminution de chaleur que notre corps éprouve. Il y a de la chaleur dans un corps que nous nommons *froid*, mais une chaleur toujours moindre que celle de notre corps, puisqu'elle diminue celle-ci. » (Art. FROID de l'*Encyclopédie de D'Alembert et de Diderot*, par de Ratte, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences de Montpellier.)

cette idée qui nous semble aujourd'hui si simple, à savoir que ce sont des phénomènes de même nature, des degrés différents de manifestation d'un même agent physique, et que l'apparente opposition entre leur mode d'action dépend entièrement de là température de notre corps et de sa sensibilité.

Nous insistons sur ces considérations, parce qu'elles permettent de comprendre comment il se fait que l'on soit si longtemps resté dans l'ignorance sur les lois de phénomènes que l'on peut observer continuellement. Tant qu'on s'en est rapporté aux sens pour l'appréciation des degrés de chaleur, et jusqu'à ce qu'on ait songé à imaginer des instruments propres à les comparer, à les mesurer, on n'a pu avoir que de vagues notions sur les lois qui les gouvernent. Il en est ainsi d'ailleurs pour tous les faits physiques ou naturels.

Nous n'avons guère que le *toucher* comme sens de la température; mais s'il permet de juger avec assez de précision des différences, il paraît qu'il n'en est pas de même des degrés absolus de température. En outre, d'une personne à l'autre, cette sorte de sensibilité doit être excessivement variable, comme nous pouvons chacun nous en rendre compte en observant autour de nous. La faculté que possède la peau d'apprécier les différences de température a été de la part de Weber l'objet d'expériences intéressantes. Ce savant a trouvé que l'on peut à l'aide du doigt distinguer des différences de 1/4 de degré centigrade, tandis que l'appréciation de la température absolue, qui exige d'ailleurs évidemment une étude préalable, n'est exacte qu'à 2 ou 3 degrés près. Cette sensibilité reste à peu près la même pour toutes les températures inférieures à 37°, c'est-à-dire à celle de notre sang, mais elle est loin d'être aussi grande pour toutes les régions de la peau. Elle dépend surtout de l'épaisseur de la peau au point expérimenté, et cela s'explique aisément, la chaleur pénétrant avec d'autant plus de rapidité que la peau est plus mince. C'est ainsi que le dos de la main est plus sensible à la chaleur que la paume; les paupières, les lèvres, la langue le sont davantage encore. On signale

aussi le coude comme possédant à cet égard une sensibilité toute spéciale, due sans doute aussi bien à la minceur de la peau qu'à l'absence de graisse en cette région. Les mères connaissent cette particularité, et elles savent fort bien s'en servir quand elles veulent baigner leurs enfants : elles plongent leur coude dans l'eau du bain, comme elles feraient d'un thermomètre. Bernstein, en rapportant, d'après Weber, le fait que nous venons de mentionner, ajoute :

« Nous sommes obligés en outre d'admettre dans la peau des organes particuliers de température, organes ayant leurs nerfs propres et qui sont plus développés dans certaines régions que dans d'autres. Il a été prouvé, en effet, que les troncs nerveux ne possèdent point la faculté de produire la sensation de chaleur, lorsqu'on les échauffe directement. On rencontre, par exemple, à la région du coude, immédiatement sous la peau et sur l'os, un nerf de la sensibilité qui occasionne de fortes douleurs lorsqu'il a reçu un choc. Lorsque l'on plonge le coude dans de l'eau chaude, on ne sent la chaleur que dans la partie immergée et non dans tout le bras, quoique ce nerf se distribue à l'avant-bras et à la main. Mais lorsque l'eau est trop chaude, on éprouve une douleur obtuse dans toute l'étendue de l'avant-bras. Le tronc nerveux est donc excité par la chaleur de l'eau; toutefois cette excitation ne se traduit pas par une sensation de chaleur, mais par de la douleur. Lorsqu'on plonge le coude dans de l'eau glacée, la douleur est absolument la même, d'où il résulte que les troncs nerveux sont incapables de ressentir la chaleur ou le froid. La sensation de douleur qui se produit dans ce cas est probablement la cause de la sensibilité extraordinaire du coude à l'égard d'une chaleur trop forte et par conséquent nuisible.

« On peut donc admettre que les nerfs possèdent, dans la peau, des organes spéciaux de température capables de produire, sous l'influence de la chaleur, une excitation nerveuse. Mais on n'a point encore découvert jusqu'ici d'organes de ce genre, ou plutôt on n'a point pu attribuer cette fonction à des

organes connus. Les corpuscules tactiles servent peut-être en même temps à la fonction du toucher et à la sensation de la chaleur, mais l'on ne peut rien dire de positif à cet égard. Weber a découvert un fait très intéressant, à savoir, que les corps chauds paraissent plus légers que les corps froids. Lorsqu'on pose sur le front d'une personne qui a les yeux fermés une pièce de 5 francs froide, puis au même endroit deux pièces de 5 francs chaudes, les deux pièces chaudes paraîtront avoir le même poids que l'unique pièce froide, et cependant la personne pourra fort bien distinguer la différence entre le poids des corps froids. Il paraît donc qu'il existe une relation entre le sens de la température et le sens du tact, mais jusqu'ici cette relation n'a point été étudiée scientifiquement[1]. »

§ 5. PRINCIPAUX EFFETS DE LA CHALEUR. — DIVISIONS DE LA SCIENCE.

Aux indications si peu précises que nos sens peuvent nous fournir sur le degré de chaleur des corps, on a heureusement substitué des instruments dont la construction et la graduation sont basées sur les effets produits dans ces corps par les variations mêmes de la chaleur. Ces effets, étudiés d'une façon tout objective, indépendante de toute appréciation personnelle, sont d'une part les *changements de volume*, d'autre part les *changements d'état*.

La *dilatation* des solides, des liquides et des gaz sous l'influence d'une augmentation de chaleur, le phénomène inverse de la *contraction* qui caractérise une diminution de chaleur et ramène le corps au volume qu'il avait dans les conditions identiques, sont un phénomène général et constant qui fera l'objet des premiers chapitres consacrés aux phénomènes calorifiques. Nous avons déjà dit dans notre premier volume, en résumant les propriétés générales des corps, que la loi de continuité qui lie l'accroissement du volume à celui de la tempéra-

1. *Les Sens*, par J. Bernstein, 1 vol. de la Bibliothèque scientifique internationale.

ture est assujettie, pour chaque nature de corps, à deux interruptions brusques correspondant aux deux passages de l'état solide à l'état liquide, et de ce dernier à l'état de vapeur ou de gaz. Les points critiques dont nous parlons subissent, outre l'influence de la chaleur, l'influence de la pression; mais, dans des conditions semblables de pression et de température, les *changements d'état*, dans un sens ou en sens inverse, offrent pareillement au physicien un terme fixe de comparaison, un point de repère précieux, qu'il utilise notamment pour la graduation de ses appareils de mesure.

Après les changements de volume, ce seront donc les changements d'état que nous décrirons dans cette première partie.

Les corps ne s'échauffent et ne se refroidissent qu'en se communiquant mutuellement la chaleur dont ils sont doués, tantôt par le contact de leurs molécules, tantôt à distance, c'est-à-dire en émettant leur chaleur au dehors de la même façon que les sources lumineuses rayonnent de tous côtés leur lumière. Ce double mode de propagation de la chaleur donne lieu à deux séries de phénomènes dont nous étudierons séparément les lois dans les chapitres consacrés à la *chaleur rayonnante* et à la *conductibilité*.

Viendra ensuite la partie de la science de la Chaleur qu'on pourrait considérer comme la plus importante, s'il était permis d'établir des degrés sous ce rapport, et si toutes les lois physiques relatives à un même ordre de phénomènes ne concouraient également au résultat suprême, qui est l'édification d'une théorie générale. Nous voulons parler des moyens à l'aide desquels on mesure, non seulement le degré, mais la quantité de chaleur nécessaire pour obtenir un effet déterminé dans un corps de poids et de température donnés. Cette partie est la *calorimétrie*.

C'est après avoir perfectionné les méthodes calorimétriques, et accumulé les données précises que ces méthodes permettent de calculer, qu'on a pu aborder enfin d'une manière fructueuse le grand problème de la nature de la chaleur, et démontrer

qu'elle n'est point une substance propre, mais un mode de mouvement, une vibration des molécules des corps, qui se communique à l'éther et se propage avec la même vitesse que la lumière. Rayons de chaleur ou rayons de lumière, ou, pour parler un langage plus rigoureux, ondulations lumineuses et ondulations calorifiques, sont des mouvements identiques, ne différant que par leur mode d'action sur nos organes, produisant ici une sensation de lumière, là une sensation de chaleur. C'est par l'exposé de cette théorie de la chaleur, par les notions les plus élémentaires de *thermodynamique*, que nous terminerons cette première partie, renvoyant à la seconde partie tout ce qui concerne l'application des phénomènes et des lois aux sciences ou arts industriels.

En résumé, notre étude des phénomènes et des lois de la Chaleur comprendra cinq divisions principales : les *changements de volume*, les *changements d'état*, la *propagation de la chaleur* par rayonnement ou par conductibilité, la *calorimétrie* et la *thermodynamique*. Ce sont aussi les grandes divisions de la science, et tous les faits que l'observation et l'expérience ont jusqu'ici permis de constater, rentrent dans l'une ou l'autre de ces catégories.

Cela posé, entrons en matière.

CHAPITRE II

DILATATION ET THERMOMÉTRIE

§ 1. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE DILATATION.

Tous les corps, quel que soit leur état physique, et à quelques exceptions près dont il sera question plus loin, augmentent de volume en s'échauffant, ou *se dilatent*. En se refroidissant, au contraire, ils *se contractent*. Décrivons quelques



Fig. 2. — Anneau de 'S Gravesande. Dilatation des solides par la chaleur.

expériences à l'aide desquelles on met aisément en évidence cette propriété, qui appartient aux solides, comme aux liquides et aux gaz.

Une sphère métallique et un anneau de même substance ont des dimensions telles, que, quand ils sont soumis à des conditions thermiques semblables, la sphère puisse passer à frottement doux par l'ouverture de l'anneau. Si l'on chauffe la boule

isolément et qu'on la pose sur l'anneau, elle ne peut plus le traverser, ce qui prouve qu'elle s'est dilatée par l'échauffement; mais si on la laisse refroidir et revenir à son état primitif, elle passe de nouveau. Si, au contraire, on échauffe l'anneau, la sphère métallique passe avec facilité au travers de l'ouverture, d'où l'on conclut que celle-ci s'est agrandie ou que l'anneau s'est dilaté. Enfin, si l'anneau et la sphère sont chauffés en même temps, tous deux augmentent de volume à la fois, et ils conservent les mêmes rapports de position qu'à l'origine. Ce petit appareil est connu sous le nom d'*anneau de 'S Gravesande*, du nom du physicien hollandais qui l'a imaginé. Les académiciens de Florence avaient démontré, par une expérience analogue, la dilatation qu'un accroissement de chaleur fait subir aux solides. Au lieu d'une sphère, ils employaient un cône métallique, que l'anneau embrassait à des hauteurs différentes, suivant que c'était l'anneau ou le cône qu'ils avaient chauffé séparément. Si l'accroissement de chaleur était le même pour l'anneau et pour le cône, c'est-à-dire si tous deux avaient été chauffés à la fois de la même manière, quoique isolément, l'anneau descendait sur le cône à une hauteur invariable. Ce dernier fait nous fournit une première indication importante sur la manière dont se dilatent les vases de forme quelconque, cylindrique, conique, etc. Leur changement de volume s'effectue comme si le vase était rempli de la substance même qui forme son enveloppe : sa capacité intérieure varie, comme le volume du noyau solide dont nous parlons varierait lui-même dans les mêmes conditions thermiques. Nous reviendrons sur ce point.

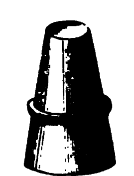


Fig. 5. — Dilatation des solides.

La dilatation des corps solides par la chaleur se fait dans tous les sens, de sorte qu'une barre métallique ayant la forme d'un parallélépipède s'allonge selon ses trois dimensions, largeur, longueur et épaisseur. De là trois sortes de dilatations : la dilatation cubique, la dilatation superficielle et la dilatation linéaire. C'est cette dernière que l'on constate au moyen de

l'appareil représenté dans la figure 4. Une barre métallique est fixée invariablement à l'une de ses extrémités. Chauffée dans toute sa longueur, elle se dilate librement par l'extrémité qui vient s'appuyer contre la petite branche d'un levier coudé, de sorte que l'aiguille formant la grande branche du même levier parcourt, sur un cadran divisé, un arc d'autant plus grand que le rapport des longueurs des deux branches sera lui-même plus considérable. De très petits allongements de la barre, qu'on aurait peine à constater par une mesure directe, sont ainsi rendus sensibles. Par exemple, il suffira de transporter un appareil semblable d'une chambre froide dans une chambre chauffée pour que l'aiguille se mette en mouvement.

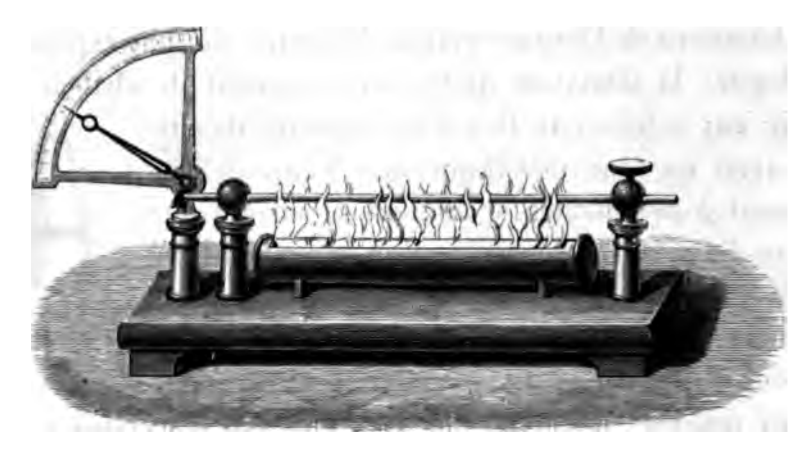


Fig. 4. — Dilatation linéaire d'une barre solide.

La variation de la chaleur produit dans les liquides des variations de volume beaucoup plus prononcées que dans la plupart des corps solides. Voici un des moyens qu'on emploie pour mettre en évidence la dilatation des liquides :

On prend un ballon de verre auquel est soudé un tube ouvert, de faible diamètre ; on le remplit du liquide qu'on veut expérimenter, et l'on marque d'un trait *a* le point où il monte dans le tube (fig. 5). Plongeant alors le ballon dans de l'eau plus chaude que le liquide, on peut suivre aisément le mouvement de ce dernier dans le tube. D'abord on voit le niveau

descendre de *a* en *b*. Cela vient de ce que c'est l'enveloppe en verre qui reçoit la première l'action de la chaleur. Sa capacité s'accroît avant que le volume du liquide intérieur ait pu compenser cette augmentation par sa dilatation propre. Mais, au bout de peu de temps, la contraction apparente cesse, et le liquide monte peu à peu jusqu'à un point *a'*, où il demeure quand l'équilibre est établi. Si l'appareil se refroidit, on verra le niveau descendre peu à peu, et reprendre à la fin sa hauteur primitive[1].

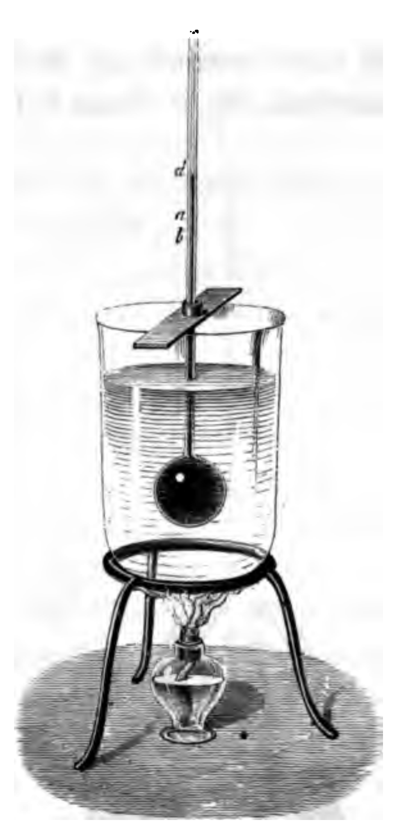


Fig. 5. — Dilatation des liquides par la chaleur.

Des liquides différents ne se dilatent pas également dans les mêmes circonstances, c'est-à-dire pour un même accroissement de chaleur. Mais, à une exception près, sur laquelle nous reviendrons bientôt (celle de l'eau), tous augmentent ou diminuent de volume, selon qu'ils s'échauffent ou se refroidissent.

Enfin, les gaz sont encore plus dilatables que les liquides. Aussi suffit-il d'approcher du feu une vessie hermétiquement fermée et à demi pleine d'air,

1. C'est à Van Helmont qu'on fait remonter la première idée de cette expérience. « Un certain Heer, dit M. Hœfer dans son *Histoire de la Physique*, ayant reproché à Van Helmont de poursuivre la chimère du mouvement perpétuel, le célèbre savant répondit qu'il avait imaginé de construire un instrument, non pas précisément pour démontrer le mouvement perpétuel, mais pour constater que « l'eau, renfermée dans une boule terminée par une « tige creuse en verre, monte ou descend, suivant la température du milieu ambiant (*juxtà « temperamentum ambientis*) ». Cette idée de Van Helmont, dont l'origine remonte au commencement du dix-septième siècle, fut reprise par Drebbel et par Sanctorius, auxquels on attribue généralement l'invention du thermomètre. » Elle le fut également vers 1660 par les académiciens de Florence.

pour la voir peu à peu se gonfler. L'air qu'elle contient augmente donc de volume par la chaleur. On constate encore d'une autre façon la dilatabilité de l'air ou de tout autre gaz sous l'influence d'une augmentation de chaleur. On prend un ballon de verre terminé par un long tube capillaire, ouvert à son extrémité (fig. 6). Dans le ballon se trouve le gaz dont on veut

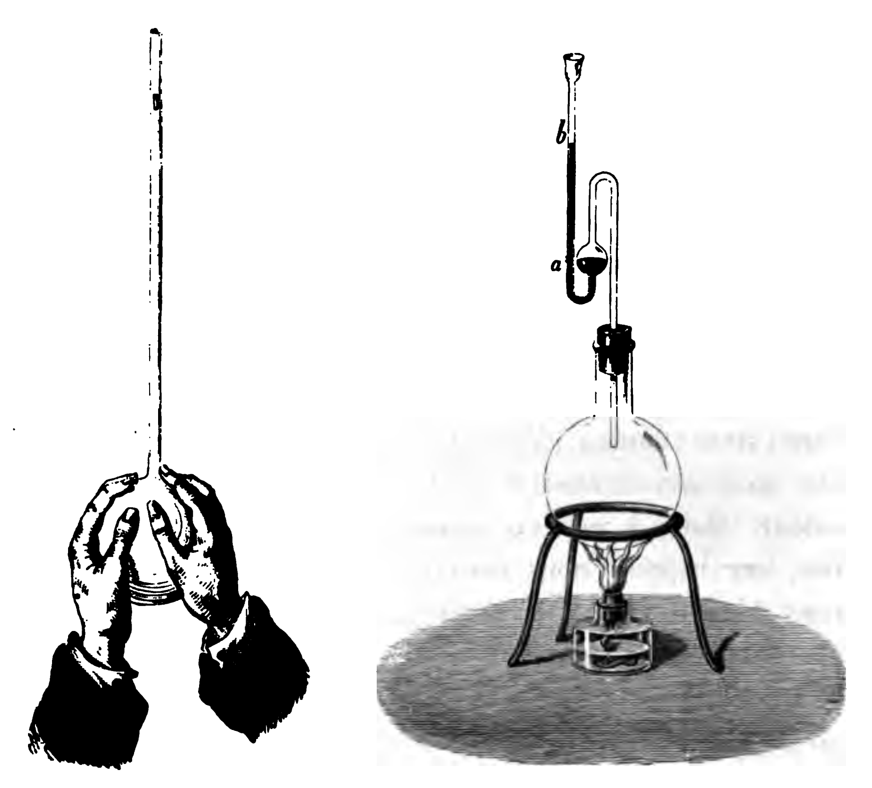


Fig. 6. — Dilatation des gaz par la chaleur.

Fig. 7. — Dilatation des gaz.

constater la dilatation, et qui est séparé de l'air extérieur par un index de mercure. Dès qu'on chauffe, même légèrement, le ballon, par le contact des mains par exemple, le gaz intérieur s'échauffe aussi, se dilate et chasse l'index loin du réservoir. Quand le gaz se refroidit, son volume diminue, et l'index reprend lui-même sa position primitive. En employant un tube doublement recourbé (fig. 7), contenant du liquide au coude inférieur, on voit la dilatation se manifester par l'ascension, de *a*

en *b*, du liquide dans l'une des branches, celle qui est la plus éloignée du ballon, tandis que le niveau descend dans l'autre.

M. Desains, dans ses *Leçons de Physique*, en constatant que les premières expériences sur la dilatation de l'air par la chaleur sont dues au Hollandais Drebbel, au commencement du dix-septième siècle, cite un curieux passage de Héron d'Alexandrie, qui prouve que les anciens connaissaient le phénomène et même l'avaient utilisé pour produire des effets assez curieux. Voici ce passage, qui mérite d'être reproduit :

« Il s'agissait de faire en sorte que « les portes d'un temple « s'ouvrissent d'elles-mêmes au moment où l'on allumait le feu « sacré sur un autel élevé sous le vestibule ». L'autel était d'airain, creux intérieurement, et communiquait par un conduit avec une outre placée dans un caveau au-dessous des portes. L'outre était distendue et allongée par un poids. Quand le feu sacré était allumé, l'air de l'autel, dilaté par la chaleur, passait dans l'outre, qui se gonflait en se raccourcissant : le poids était donc soulevé, et ce mouvement, à l'aide de cordons de renvoi, se transmettait à un axe vertical au prolongement duquel la porte était attachée : la rotation de l'axe forçait celle-ci à s'ouvrir. Quand le feu était éteint, le refroidissement de l'air permettait au poids moteur de redescendre à sa première position, et la porte se fermait. » (Héron, *Spir. lib.*)

Les variations de volume sous l'influence des variations de chaleur, voilà donc un phénomène général, qui se constate aussi bien dans les liquides et les gaz que dans les solides. Les exceptions à cette loi, ou bien ne sont qu'apparentes, ou bien se trouvent restreintes à des cas tout particuliers, et nous verrons plus loin quelle interprétation peut être donnée de ceux-ci. Le bois et la plupart des végétaux se contractent quand on les chauffe; cela provient de l'eau qu'ils perdent par évaporation; mais quand ils sont complètement desséchés, ils se dilatent comme les autres solides. L'argile, bien desséchée, se contracte d'autant plus qu'on la soumet à une chaleur plus intense; mais il y a là une modification dans l'état chimique

de la substance, un commencement de vitrification; quand le morceau d'argile est refroidi, il ne revient plus à son volume primitif. Enfin l'eau, au voisinage de son point de congélation, se dilate en se refroidissant, et cette anomalie tient sans doute aussi à une modification dans la forme et dans la disposition des molécules[1].

Puisque le volume d'un corps quelconque varie avec sa température, sans que d'ailleurs son poids change, il est évident que son poids spécifique change aussi : il diminue quand le corps s'échauffe, augmente quand il se refroidit, de sorte que la détermination de cet élément exige, comme nous l'avons vu du reste dans notre premier volume, ou bien qu'on opère à la température fixe de zéro, ou bien, si cela n'est pas possible, que l'on connaisse la quantité dont le volume s'accroît pour chaque augmentation d'un degré de chaleur. En pareil cas, la mesure de la température est également nécessaire. A l'aide de ces données, on obtient, par une correction convenable, le poids spécifique ou la densité du corps à zéro.

Dans tout ce qui précède, comme dans toutes nos descriptions antérieures des phénomènes physiques, lumineux, électriques, sonores, nous avons supposé que l'on connaissait l'usage du thermomètre et la définition de sa graduation. Nous avons fait ainsi un cercle vicieux, ce qui est inévitable dans les sciences physiques, où les phénomènes de divers ordres sont le plus souvent dans la dépendance les uns des autres. Mais le moment est venu de nous arrêter à ce point important et de décrire, avec quelques détails, l'instrument précieux que nous venons de nommer : sa construction est en effet basée précisément sur les phénomènes de dilatation. Dès que cette description sera terminée, nous compléterons ce que nous avons à dire de ces derniers.

1. Toutefois nous verrons plus loin que M. Fizeau a constaté une exception à la loi générale de la dilatation des solides par la chaleur : l'iodure d'argent se contracte et reprend son volume, quand on le ramène à sa première température. Cette exception singulière ne paraît pas susceptible des explications que nous venons de donner pour le bois, l'argile et l'eau.

§ 2. DÉFINITION DE LA TEMPÉRATURE. — SA MESURE PAR LE THERMOMÈTRE.

Si l'on s'en rapportait à l'étymologie littérale, les mots *thermométrie*, *thermomètre* signifieraient *mesure de la chaleur*, instrument ayant pour objet la *mesure de la chaleur*. Or tel n'est point le sens exact de ces expressions, et il importe dès le début de dissiper à cet égard toute idée erronée.

Le thermomètre ne mesure point les quantités de chaleur, mais seulement les variations de la *température*, de l'état thermique des corps. Qu'est-ce donc que la température, quelle idée précise devons-nous nous faire de cette expression, qui revient si souvent dans le langage scientifique?

Quand deux ou plusieurs corps sont en présence dans une enceinte limitée, il arrive en général que les uns perdent de la chaleur ou se refroidissent, tandis que les autres s'échauffent ou gagnent de la chaleur. A ces augmentations et diminutions de chaleur correspondent, ainsi que nous venons de le voir, des dilatations et des contractions, des changements de volume des corps en présence. Nous verrons plus tard par quels modes se produit cet échange, qui, au bout d'un certain temps, si aucune source extérieure de chaleur n'intervient, aboutit à un état stationnaire, à un état d'équilibre entre tous les corps en question. C'est cet état d'équilibre thermique que l'on nomme *température*, et tous les corps entre lesquels existe, à un moment donné, cet état auquel correspond pour chacun d'eux un volume déterminé, sont dits avoir *la même température*. Que l'un d'eux, pour une raison quelconque, vienne à s'échauffer, et par suite à augmenter de volume, on dit alors que sa température *s'élève;* elle *s'abaisse* si le corps se refroidit et que son volume diminue. Mais toutes les fois que, après des variations quelconques de température, des échauffements ou des refroidissements, le corps reprend son volume primitif, sa température aussi redevient la même; mis en présence des sys-

tèmes avec lesquels il était primitivement en équilibre et qui, par hypothèse, n'ont pas changé, il se retrouvera en équilibre avec eux. L'expérience prouve en définitive qu'à une quantité de matière donnée et invariable d'une certaine substance correspond, pour un état thermique particulier, un volume déterminé du corps. Il résulte de là que les variations de la température peuvent être mesurées par les variations de volume ou les dilatations. En effet, supposons qu'on prenne un corps solide, liquide ou gazeux, et qu'on fasse en sorte que la quantité de matière dont il est composé reste invariable, ou, si l'on veut, que son poids reste toujours le même. On conçoit la possibilité de mesurer, quand il s'échauffe ou se refroidit, soit son volume même, soit les variations de ce volume. Or ce sont précisément ces variations ou degrés qui serviront de mesure à l'échauffement ou au refroidissement du corps, de sorte que, toutes les fois qu'il aura le même volume déterminé, on pourra être assuré qu'il est dans le même état thermique, qu'il est à la même température.

Mais si ces variations de volume peuvent servir à indiquer les changements qui surviennent dans la température des corps, il faut se garder de croire qu'elles mesureraient de même les quantités de chaleur qui ont servi à produire ces changements. Nous verrons plus loin en effet que, pour élever d'un même nombre de degrés la température de corps différents, par exemple d'un kilogramme d'eau et d'un kilogramme de mercure, d'or ou de fer, il s'en faut que la quantité totale de chaleur à employer soit la même.

D'après les considérations qui précèdent, on voit qu'un thermomètre n'est autre chose qu'un corps dont on sait mesurer les variations de volume déterminées par les variations de sa propre température. En le mettant en présence ou mieux au contact d'un autre corps quelconque, il se mettra en équilibre thermique avec lui, et par cela même indiquera la température de ce corps, non, il est vrai, la température antérieure au contact, mais la température d'équilibre. Il importera donc de

rendre aussi faible que possible la différence entre ces deux températures, et pour cela, il faudra que la masse et la nature de la substance formant l'instrument soient telles, que le contact ne modifie pas sensiblement la température du corps en expérience. De là des conditions particulières à remplir en ce qui concerne le choix de la substance à employer pour la construction du thermomètre.

Les solides, les liquides, les corps gazeux se dilatant tous, on pourrait prendre indifféremment les uns ou les autres pour corps thermométriques, et en réalité on les emploie également à cet usage. Mais pour les températures usuelles et les observations courantes on rejette les solides et les gaz. Les solides sont fort peu dilatables, quand les variations de température ne sont pas considérables ; de plus, l'action de la chaleur modifie leur structure moléculaire, de sorte qu'ils ne reprennent pas rigoureusement, en se refroidissant, leur volume primitif. Aussi ne les emploie-t-on que pour la mesure des températures très élevées ; pour les distinguer des thermomètres ordinaires, on donne aux appareils de ce genre le nom de *pyromètres*. Nous décrirons toutefois des appareils très sensibles, dont les indications sont basées sur les inégalités de dilatation des métaux et qui sont très propres à accuser de faibles et rapides variations de température.

Si les solides se dilatent trop peu, il n'en est pas de même des gaz, que leurs grandes variations de volume rendent éminemment propres à indiquer de faibles différences de température. Malheureusement, à côté de cet avantage, les gaz ont un grave inconvénient : leurs changements de volume ne dépendent pas de leur seule température ; ils subissent l'action des variations de pression, de sorte que tout emploi du thermomètre à gaz, qui constitue en outre un appareil encombrant, non portatif, se complique de l'observation du baromètre et des calculs nécessaires pour les réductions à une pression constante.

C'est donc aux liquides qu'on a donné la préférence, et,

parmi les liquides, c'est le mercure et l'alcool qu'on emploie le plus habituellement. Le premier s'obtient aisément pur; il reste liquide à une température très élevée et ne se solidifie qu'à des températures assez basses; sa dilatation est régulière, et sa conductibilité, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle il se refroidit ou s'échauffe, est plus grande que celle de tous les autres liquides. Quant à l'alcool, s'il se réduit en vapeur à une température peu élevée, en revanche il n'a pu être congelé à quelque degré de froid qu'on l'ait exposé, ce qui le rend éminemment propre à la mesure des basses températures. Avec un thermomètre à mercure et un thermomètre à alcool, on peut donc mesurer toutes les températures comprises entre les plus basses températures connues et celle de l'ébullition du mercure. Mais c'est le premier de ces appareils qui sert à graduer le second, et sa description doit naturellement précéder l'autre. Disons donc par quelles opérations il faut passer pour construire un thermomètre à mercure.

§ 3. LE THERMOMÈTRE A MERCURE. — CONSTRUCTION ET GRADUATION.

Le thermomètre à mercure est formé d'un tube de verre à diamètre intérieur très petit ou capillaire, fermé par un bout, et terminé à l'autre bout par un réservoir sphérique ou cylindrique (fig. 8). Le réservoir et une partie du tube renferment du mercure parfaitement pur, et le reste du tube est entièrement purgé d'air et de tout autre gaz. Comme la capacité intérieure du tube n'est qu'une très petite fraction de la capacité du réservoir, la moindre variation de volume de ce dernier se manifestera par un changement notable du niveau du mercure dans le tube. Pour mesurer ces variations, on convient de marquer sur le tube du thermomètre deux points qui correspondent à deux températures inégales, mais l'une et l'autre fixes et invariables, et de diviser en un certain nombre de capacités égales l'accroissement total de volume que subit l'instrument

en passant de la plus basse de ces températures à la plus élevée. L'expérience ayant montré que la glace fond toujours à la même température, et que la température de la vapeur d'eau bouillante est pareillement constante quand la pression barométrique est de 760 millimètres, ce sont ces deux températures fixes qu'on est convenu de prendre comme points de repère pour la graduation du thermomètre à mercure. Avant de dire comment on procède pour cette graduation, revenons sur quelques points importants de la manipulation qui a pour objet le choix du tube, son remplissage de mercure bien purifié et purgé d'air.

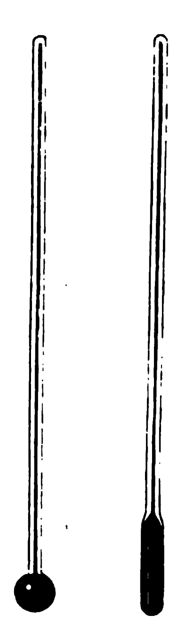


Fig. 8. — Réservoir et tube du thermomètre à mercure.

La pureté du mercure est une des premières conditions à remplir pour avoir un bon thermomètre. Voici ce qu'en dit Buignet dans ses excellentes *Manipulations de physique :*

« Le mercure que l'on trouve dans le commerce et qui a séjourné dans les cuves de nos laboratoires contient toujours de l'oxyde de mercure, et souvent aussi des métaux étrangers, tels que le zinc, le cuivre, le plomb. La présence de ces métaux modifie profondément ses propriétés physiques, et lui donne, entre autres caractères, celui d'adhérer au verre, d'y laisser une trace de son passage et de devenir, par cela même, impropre aux usages thermométriques.

« La distillation est un moyen de purification très imparfait. Au terme où le mercure entre en ébullition, les métaux qui l'accompagnent émettent des vapeurs dont la tension est très sensible, et qui d'ailleurs sont facilement entraînées par la vapeur mercurielle. Il faut donc recourir à un autre procédé, et celui que l'on considère aujourd'hui comme fournissant les meilleurs résultats est le traitement par l'acide nitrique.

« Ce procédé consiste à introduire dans un flacon de verre le mercure que l'on veut purifier, et à y ajouter 0,01 en poids

d'acide nitrique à 1,42 préalablement étendu de deux fois son volume d'eau. Le vase est placé dans un bain-marie à 50° ou 60°, et on l'y maintient pendant vingt-quatre heures, en agitant fréquemment le mélange. Au bout de ce temps, on enlève par décantation la solution surnageante, qui emporte avec elle les métaux étrangers ; on lave à grande eau le mercure ainsi purifié, et on le sèche avec le plus grand soin.

« Le mercure, exposé à l'air, en absorbe l'oxygène, surtout pendant les chaleurs de l'été, et forme de l'oxyde de mercure, qui a les mêmes inconvénients, au point de vue qui nous occupe, que les métaux étrangers dont il vient d'être question. Lorsqu'on agite le mercure ainsi altéré, l'oxyde qu'il contient se dissémine dans la masse ; mais, par le repos, il remonte à la surface et y forme une pellicule grise. On a coutume, dans les laboratoires de physique, lorsque le mercure a été purifié et séché comme il vient d'être dit, de l'introduire dans un entonnoir de verre muni d'un robinet. Au moment d'en faire usage, on ouvre doucement le robinet, et l'on fait couler le liquide dans un verre à pied bien propre et bien sec. On a ainsi du mercure exempt d'oxyde, parfaitement miroitant, n'adhérant ni au verre ni à la porcelaine, et roulant sur l'une ou l'autre de ces deux substances sans y laisser la moindre trace. »

Quand on a observé les minutieuses précautions nécessaires à l'obtention d'un mercure d'une pureté parfaite, on comprend qu'il n'est pas moins important de l'introduire dans un tube qui soit lui-même parfaitement sec et exempt de poussière. C'est l'affaire du constructeur qui fournit le tube muni de son réservoir et de l'ampoule terminée en pointe effilée, par où doit se faire l'introduction du mercure. Voici maintenant comment se fait ce remplissage.

On brise la pointe de l'ampoule et l'on chauffe légèrement celle-ci au-dessus d'une lampe à alcool ; l'air intérieur se dilate ; on plonge aussitôt la pointe ouverte dans le mercure comme le montre la figure 9. Le refroidissement diminue la pression intérieure et le mercure monte peu à peu dans

l'ampoule, qu'il remplit partiellement. Si l'on redressait le tube, le mercure resterait dans l'ampoule sans pouvoir pénétrer dans le réservoir, à cause de l'étroitesse du diamètre du tube. Mais si



Fig. 9. — Remplissage du tube thermométrique à mercure.

l'on a soin de chauffer à la fois le tube, le réservoir et l'ampoule en les disposant sur une grille à charbons inclinée (fig. 10), l'air intérieur, en se dilatant, s'échappe par bulles. Si alors on

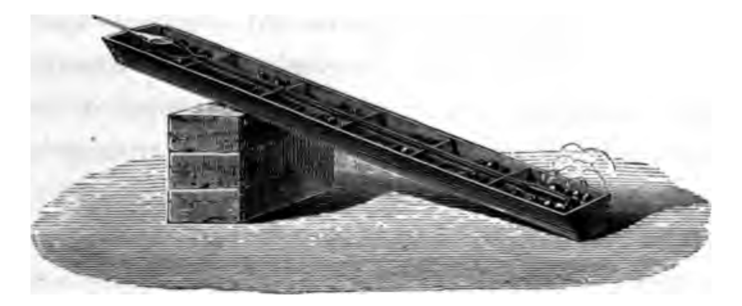


Fig. 10. — Introduction du mercure dans le réservoir.

retourne le tube verticalement, et qu'on le laisse refroidir, l'air intérieur se contracte et la pression fait entrer une partie du mercure dans le réservoir. On répète plusieurs fois cette opération, et enfin l'on porte le mercure à l'ébullition : le réservoir

et le tube se remplissent entièrement, ne conservant plus ni trace d'humidité, ni aucune bulle d'air.

Si la capacité du réservoir et celle du tube ont été préalablement calculées[1] pour que les indications du thermomètre se meuvent dans une limite d'un nombre de degrés déterminé, de 120 degrés par exemple, entre 105° et —15°, on s'arrange de façon que le niveau du mercure occupe le sommet de la tige quand le tube est soumis à une température de 105°. On fait écouler le mercure de l'ampoule, le niveau s'abaisse un peu par le refroidissement. Chauffant l'extrémité du tube à la lampe d'émailleur, on l'étire en pointe effilée, on détache l'ampoule par un trait de lime; on chauffe à nouveau à 105°. Le mercure sort en fines gouttelettes, et l'on ferme la pointe du tube au chalumeau dès que l'écoulement a cessé. Dans ces conditions, le tube se trouve absolument privé d'air et, lorsque le mercure baisse sous l'influence du refroidissement, l'espace qu'il laisse au-dessus de son niveau est pareil au vide du baromètre.

Les détails un peu minutieux dans lesquels nous venons d'entrer n'ont pas seulement pour objet de donner les indications convenables à ceux de nos lecteurs qui voudraient construire eux-mêmes un thermomètre un peu précis. Notre but, en les rapportant, a été surtout de faire bien comprendre la nécessité où les progrès de la science ont conduit l'expérimentateur, de ne négliger aucune des conditions de l'exactitude la plus rigoureuse dans les manipulations de physique. A l'origine, on a dû se contenter d'approximations souvent grossières; cela suffisait pour l'étude des phénomènes les plus généraux et pour la détermination de leurs lois. De même qu'en astronomie la connaissance des plus petites perturbations des mouvements des corps célestes aurait risqué de masquer les lois qui régissent ces

1. La dilatation apparente du mercure dans le verre est de $\frac{1}{6480}$ pour 1 degré centigrade. Pour 120 degrés, la capacité intérieure du tube devra donc être au moins $\frac{120}{6480}=\frac{1}{54}$ de celle du réservoir. On prend un nombre un peu plus fort, $\frac{1}{50}$ par exemple, comprenant 129°,6.

mouvements pris dans leur ensemble, de même en physique il eût été superflu, nuisible peut-être, de s'attacher au début à des mesures d'une exactitude que ne comportait point l'état de la science. Aujourd'hui, au contraire, c'est cette exactitude qui est de règle, parce qu'elle est la condition et le gage des découvertes futures. Le thermomètre étant un des plus précieux appareils des laboratoires de physique ou des observatoires des phénomènes naturels, nous avons saisi l'occasion de sa description pour donner une idée de la précision actuelle qui préside à sa construction.

Revenons maintenant à la dernière opération qu'il nous reste à décrire, celle de la graduation de l'instrument.



Fig. 11. — Détermination du zéro du thermomètre à mercure ; température de la fusion de la glace.

Cette graduation, nous l'avons dit, est tout entière basée sur la constance de deux phénomènes : l'un, la fusion de la glace, qui va nous donner le zéro ou le point de départ de l'échelle thermométrique ; l'autre, l'ébullition de l'eau pure à l'air libre, ou mieux la vapeur qui s'en échappe, sous la pression extérieure ou barométrique de 760 millimètres, qui donne une seconde température fixe, qu'on est convenu de désigner en degrés par le nombre 100. Voyons comment on obtient pratiquement ces deux points fixes sur le tube de notre thermomètre dûment rempli.

On commence par déterminer le zéro. Pour cela, on plonge le réservoir et une partie du tube dans un vase rempli de morceaux de glace pilée, et percé de trous à sa partie inférieure, afin que l'eau de fusion, qui pourrait prendre une température plus élevée que celle de la glace fondante, puisse s'écouler librement (fig. 11). Le niveau du mercure dans le tube étant devenu stationnaire, on marque à la même hauteur un trait sur la tige : ce point est le *zéro* de la graduation.

On place ensuite le thermomètre dans la position qu'indique la figure 12, c'est-à-dire dans une étuve où il se trouve complètement plongé dans la vapeur d'eau bouillante; l'étuve se compose d'une double enveloppe en tôle, où circule la vapeur avant

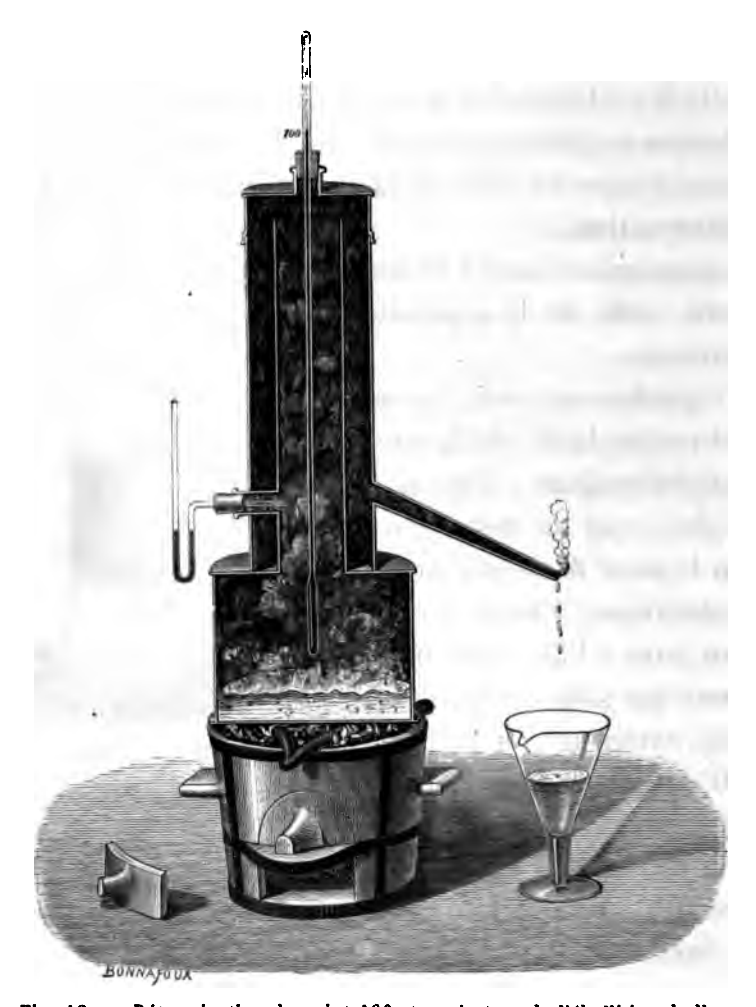


Fig. 12. — Détermination du point 100, température de l'ébullition de l'eau sous la pression de 760 millimètres.

de s'échapper dans l'air, de sorte que la température de la capacité interne n'est pas modifiée par le refroidissement extérieur. Là encore, on attend que le niveau du mercure, observé au dehors de l'étuve, soit devenu stationnaire, et l'on marque un second trait sur la tige. En ce point, on inscrit le nombre 100,

si, comme nous l'avons dit, la pression barométrique est, à ce moment, de 760 millimètres[1]. Le manomètre à branches recourbées, qu'on voit sortir à gauche de l'appareil, indique par l'égalité de niveau du liquide si la pression dans l'étuve est la même qu'au dehors; quant à cette pression extérieure, on l'observe à l'aide du baromètre, et si elle est plus petite ou plus grande que 760 millimètres, on fait la correction dont nous parlons dans la note ci-dessous.

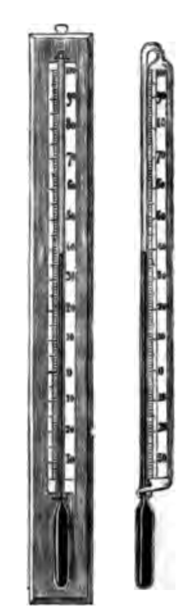


Fig. 13. — Thermomètres centigrades avec leurs échelles graduées.

Dans le cas où l'intérieur du tube est parfaitement cylindrique, ce dont on a pu s'assurer avant d'y souder le réservoir du thermomètre, il est évident que, si l'on partage en 100 parties d'égale longueur l'intervalle qui sépare le zéro de la glace fondante du point 100 correspondant à la température de l'ébullition de l'eau, chacune de ces parties indiquera des capacités égales, et quand le niveau du mercure les parcourra successivement, des dilatations égales du liquide. Ces divisions, qu'on nomme des *degrés*, forment l'échelle des températures, échelle qu'on prolonge du reste au-dessus de 100° et au-dessous de 0°, pour la mesure des températures plus basses que celle de la glace fondante, ou plus élevées que celle de l'eau bouillante. Les divisions sont tantôt gravées sur le tube, tantôt sur un tube latéral soudé au premier, tantôt enfin marquées sur la planchette à laquelle on fixe l'instrument (fig. 13).

1. Si la pression barométrique n'est pas, au moment de l'expérience, de 760mm, le niveau du mercure n'indiquera plus le point fixe où l'on doit marquer 100°. On a reconnu que la différence était de 1 degré centigrade (c'est la 100e partie de la dilatation totale entre le point de fusion de la glace et celui de l'ébullition de l'eau) pour une pression qui diffère de 27mm en plus ou en moins de 760mm, de sorte qu'il faudra marquer 101° si la pression est 787mm, et 99° si au contraire elle est seulement de 733mm. Entre ces limites, on fait une correction proportionnelle à l'excès ou au défaut de pression. Par exemple, si la pression est 768mm, la température correspondante devra être $100^\circ - \frac{8}{27} = 99^\circ,70$. Si elle est 768mm, on devra marquer une température de $100^\circ + \frac{8}{27} = 100^\circ,30$.

La division de l'intervalle de 0° à 100° en 100 parties équidistantes se fait à l'aide de la machine à diviser. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

La figure 14 représente une de ces machines d'après le modèle établi par notre savant et habile constructeur, M. Duboscq. Sa partie essentielle est une vis micrométrique en acier, dont le pas ou la distance entre deux filets consécutifs est partout égale à 1 millimètre. Cette vis, encastrée à ses deux extrémités entre deux colliers fixes, peut tourner sur elle-même autour de son axe, mais elle n'avance ni ne recule jamais elle-même.

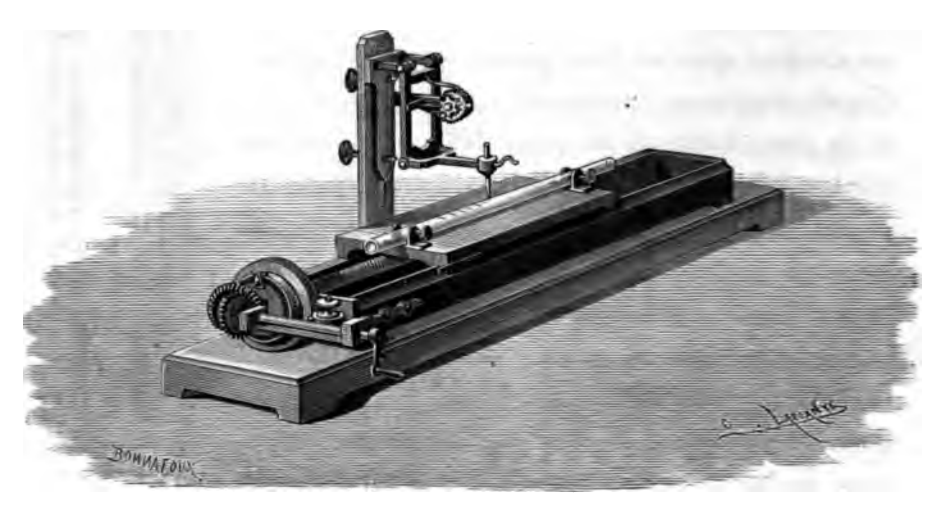


Fig. 14. — Machine à diviser de M. Duboscq.

Le mouvement de rotation de la vis communique à un écrou qui l'embrasse, et qui porte une plaque métallique ou chariot, un mouvement de progression qui fait avancer ou reculer le chariot sur un banc de fonte muni de rails, selon que la vis tourne dans un sens ou dans le sens opposé. Ce mouvement de progression comprend autant de millimètres et de fractions de millimètre que l'on fera faire de tours ou de fractions de tour à la vis; une manivelle sert à cet effet, et un index permet de compter ces fractions de tour sur un cercle divisé centré sur l'axe de la vis et formant la tête de cette vis. Les divisions du cercle étant au nombre de 400, chacune d'elles cor-

respond à un recul ou à une avance de la 400e partie d'un millimètre.

On place le tube à diviser sur le chariot, où on le fixe. Un burin, consistant soit en un tracelet en acier, soit en une pointe de diamant, selon que les divisions doivent être marquées sur un vernis ou gravées sur le tube de verre, est porté par une pièce fixe, de sorte que la pointe du burin a une position invariable par rapport à la longueur de la vis. Mais le burin est mobile dans le plan vertical correspondant à cette position, ce qui permet de le relever ou de l'abaisser à volonté.

On commence par amener le chariot dans deux positions successives telles, que la pointe du burin coïncide exactement d'abord avec le point *zéro* du tube, puis avec le point 100. Cette manœuvre donne exactement la longueur de l'intervalle compris entre les deux points, si l'on a compté le nombre de tours et la fraction de tour accomplis par la vis. Supposons qu'on ait trouvé 172 tours complets, plus 100 divisions; la distance totale des points fixes est alors égale à 172^{mm},25, correspondant à 68900 divisions micrométriques. Chaque degré devra mesurer 1^{mm},7225 correspondant à 689 divisions, c'est-à-dire à un tour complet plus 289 divisions. La manœuvre du chariot devra donc se faire de façon à l'avancer successivement de la longueur d'un degré, en tournant la manivelle d'un tour complet et 289 divisions. A chaque fois, la pointe abaissée marquera ou gravera une division sur le tube.

Dans le cas où le tube du thermomètre n'aurait pas un calibre parfaitement régulier, il faudrait, avant de le remplir comme nous l'avons dit, le diviser préalablement en parties d'égale capacité. On y parvient en introduisant une petite quantité de mercure à laquelle on fait occuper successivement, à la suite les unes des autres, des parties du tube dont on marque les extrémités. Les longueurs de ces parties sont inégales, mais leurs volumes sont égaux. Le tube rempli et les points fixes déterminés, on calculera aisément la valeur en degrés de l'une de ces parties et par suite la longueur du degré

dans chacune d'elles. Ces calculs faits, la machine à diviser servira à compléter la graduation comme on vient de le dire plus haut.

Il est bien évident que tout ce qui précède s'applique à la prolongation des divisions du tube thermométrique au-dessous du zéro et au delà du point fixe 100°. Enfin les mêmes opérations se feraient pour la division du thermomètre à alcool, avec la seule différence que le nombre des divisions au-dessus de 0°, dans ce cas, ne s'élève pas ordinairement au-dessus de 75, puisque l'alcool bout à la température de 78 degrés centigrades[1].

La construction et la graduation de ce dernier thermomètre exigent quelques précautions spéciales, dont nous allons dire un mot. Le choix du tube se fait de la même manière que pour le thermomètre à mercure; seulement, comme l'alcool, entre 0° et 100°, se dilate environ sept fois autant que le mercure, le tube, à égalité de volume du réservoir, doit avoir un diamètre beaucoup plus grand que celui du tube destiné au thermomètre à mercure. La précaution à prendre pour le choix du liquide a trait surtout à la pureté et à l'homogénéité de l'alcool, qui doit être absolument anhydre. On a l'habitude, pour rendre plus visibles les indications de niveau, de colorer l'alcool au moyen de l'orcanette, de l'orseille. Mais, comme le remarque M. Buignet, « c'est là une addition qui ne doit se faire qu'avec beaucoup de ménagement, et qui doit même être exclue dans les thermomètres de précision. La matière colorante, ainsi introduite dans l'alcool, subit toujours au bout d'un temps plus ou moins long une décomposition particulière dont l'effet est de déposer un produit insoluble sur le verre, et de nuire au mouvement régulier de la liqueur[2]. » On fait pénétrer l'alcool dans le tube à peu près comme on le fait pour le mercure.

1. C'est la température de l'ébullition à l'air libre. A l'intérieur du tube thermométrique, l'alcool peut dépasser 78° sans bouillir : l'atmosphère de vapeur qui se dégage du liquide s'opposerait à l'ébullition. Cela explique comment Deluc, ainsi qu'on le verra dans le § 5, a pu graduer un thermomètre à alcool en prenant pour second point fixe l'eau bouillante ou 80° Réaumur.

2. *Manipulations de physique*, p. 153.

Cela fait, on détermine le zéro par l'immersion du réservoir dans un vase rempli de glace fondante. On prend pour second point fixe 50°, par exemple, et l'on obtient la position de ce point sur le tube par comparaison avec un thermomètre à mercure, en plongeant les deux tubes dans un même bain qu'on chauffe à cette température de 50° au moyen d'un bec de gaz convenablement réglé. Il ne reste plus alors qu'à diviser le tube.

Le thermomètre à mercure et le thermomètre à alcool, construits avec les précautions que nous venons de décrire en détail, ne sont réellement comparables et ne s'accordent rigoureusement que pour les points fixes de la glace fondante et pour le 50e degré. Pour les températures intermédiaires comme pour celles qui les dépassent en dessus et en dessous, l'accord n'existe plus, ce qui tient à l'irrégularité de la dilatation de l'alcool. Nous reviendrons plus loin sur ce point important.

§ 4. ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES DIVERSES.

L'échelle centésimale n'est pas la seule qui ait été employée pour graduer les thermomètres ; mais c'est la plus généralement adoptée, et la seule dont on se serve aujourd'hui en France et dans un grand nombre d'autres pays. Elle est due au savant Suédois Celsius, qui en proposa l'adoption en 1741. L'échelle de Réaumur, aujourd'hui abandonnée, divisait en 80 degrés l'intervalle des deux mêmes points fixes, de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante. Un calcul très facile permet de transformer en *degrés centigrades* une température exprimée en *degrés Réaumur;* il suffit d'ajouter au nombre donné son *quart :* ainsi 28° R valent 28 + 7° ou 35° C. D'une température centigrade, retranchez le cinquième, vous aurez la même température exprimée en degrés Réaumur : ainsi 35° C valent 35° — 7° ou 28° R ; 32° C valent 25°,6 R.

Dans l'échelle Fahrenheit, usitée en Allemagne, en Angleterre et aux États-Unis, l'un des points fixes est celui de l'ébullition de l'eau, comme dans les échelles précédentes; mais l'autre correspond à une température plus basse que celle de la glace fondante, qu'on obtient par un mélange de glace et de sel ammoniac[1]. Le zéro est donc plus bas; au point d'ébullition de l'eau, Fahrenheit a marqué 212°. Comme on a reconnu que la température de la glace fondante correspondait au 32e degré de cette échelle, il en résulte que les 100 degrés de l'échelle centigrade équivalent à 180 degrés Fahrenheit : de là une transformation facile d'un nombre quelconque de degrés d'une de ces échelles dans l'autre. Veut-on savoir, par exemple, quel est en degrés centigrades l'équivalent de 120 degrés F? On commence par retrancher 32, ce qui donne 88, dont on prend les $\frac{5}{9}$; et l'on a pour résultat 46°,66 C. Au contraire, étant donnée la température 45° C, pour la transformer en divisions de l'échelle Fahrenheit, on en prend les $\frac{9}{5}$, ce qui donne 81° F au-dessus de la glace fondante, laquelle est marquée 32°, comme on l'a vu plus haut; 81° + 32° ou 113° F est donc le résultat de la transformation.

On emploie encore, notamment en Russie, l'échelle de Delisle, qui marque 0° au point d'ébullition, et 150° à la glace fondante. Rien de plus simple que de transformer une température notée sur cette échelle en une quelconque des trois autres. Par exemple, 45 degrés sur l'échelle de Delisle ont la même valeur que 30 degrés centigrades, mais il faut les retrancher de 100, puisque la lecture se fait en sens inverse. On aura donc : 45° D = 70° C = 56° R = 158° F. Il serait évidemment à désirer, pour éviter ces transformations, très faciles, mais très fastidieuses lorsqu'elles se multiplient, que les physiciens et les météorologistes de tous les pays convinssent d'adopter une échelle thermométrique unique.

1. Fahrenheit avait pris pour zéro de son échelle, ou pour point de départ de sa graduation, cette température qui ne correspond point à un phénomène physique fixe, parce qu'elle était celle du froid le plus vif qui eût été observé à Dantzig avant 1714.

Il faut avoir soin, quand on énonce une température, suivant l'une ou l'autre de ces graduations, d'indiquer si elle est plus élevée ou plus basse que celle marquée par le zéro. C'est ce que font les physiciens en considérant les températures plus élevées que 0° comme *positives*, et en les faisant précéder du signe +. Les températures inférieures à 0° sont alors négatives, et on les affecte du signe —. Ces conventions une fois adoptées, il en résulte, pour les opérations à effectuer sur les nombres exprimant les températures, quand on les combine par voie d'addition ou de soustraction, des règles pareilles à celles des quantités algébriques positives et négatives. Mais il importe de donner à tous ces nombres leur signification véritable, et de se garder de leur attribuer une valeur absolue qu'ils n'ont pas. Ainsi, on ne peut dire qu'une température est double ou triple d'une autre, ou du moins, si l'on emploie ces expressions, il n'en faut rien conclure sur les quantités de chaleur qui leur correspondent. Cela signifie tout simplement que la dilatation du mercure, au-dessus du point fixe pris pour point de départ ou zéro, est dans ce cas double ou triple de la dilatation totale correspon-

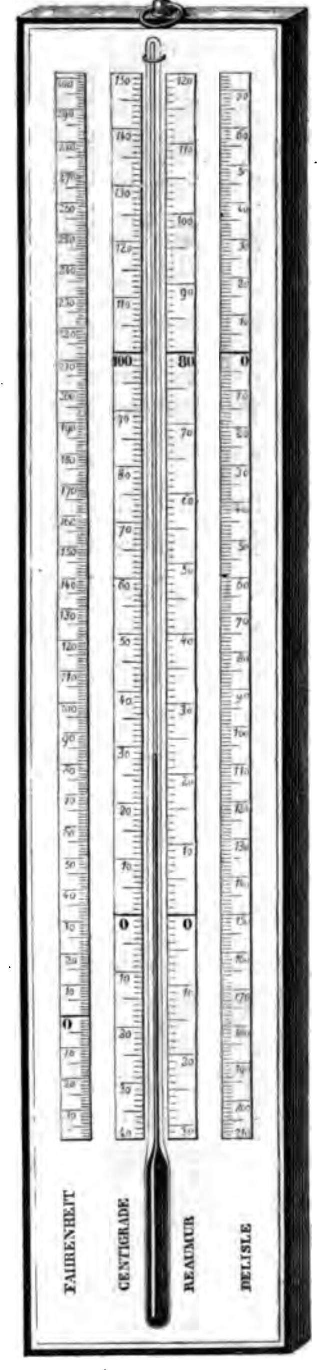


Fig. 15. — Échelles thermométriques.

dant à la seconde élévation de température. En un mot, il faut se rappeler que l'unité de température, le degré centigrade dans l'échelle centésimale, par exemple, représente une dilatation du mercure contenu dans le réservoir d'un thermomètre égale à la centième partie de la dilatation totale que subirait le même liquide en passant de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition de l'eau. Rien de plus.

§ 5. THERMOMÈTRES DIVERS. — COMPARAISON AVEC LES THERMOMÈTRES A MERCURE ET A AIR.

Le mercure et l'alcool ne sont pas les seuls liquides avec lesquels les physiciens aient cherché à construire des thermomètres. Un physicien de la fin du siècle dernier, Deluc, compara les indications fournies par des thermomètres construits et gradués séparément, et remplis des quatre liquides suivants : mercure, alcool, huile d'olive et eau. Ces deux derniers ne pouvaient donner que des températures supérieures à celle de la fusion de la glace. Voici, en degrés Réaumur, les résultats obtenus par ce savant :

Thermomètre	à mercure.	— 10°	— 5°	0	20°	40°	60°	80°
—	à huile . .	»	»	0	19,3	39,2	59,3	80
—	à alcool. .	— 7,7	— 3,9	0	16,5	35,1	56,2	80
—	à eau. . .	»	»	0	4,1	20,5	45,8	80

Les points fixes 0° et 80° sont identiques : cela devait être, puisqu'ils avaient été les points de départ pour la graduation. Mais les différences sont très sensibles pour les températures intermédiaires, et l'on voit notamment qu'elles sont considérables pour l'eau. Des recherches faites, de 1846 à 1852, par M. Is. Pierre, sur la dilatation d'un grand nombre de liquides, il résulte que les thermomètres qui se rapprocheraient le plus du thermomètre à mercure seraient ceux qu'on remplirait de sulfure de carbone, d'alcool, d'éther ordinaire, de chlorure d'éthyle et de bromure d'éthyle. Comme la température d'ébul-

lition de ces liquides est respectivement de 48°, de 78°, de 35°,5, de 11° et de 40°,7, les thermomètres ainsi construits ne pourraient servir qu'à l'indication des basses températures. C'est l'eau qui fournit le plus grand désaccord avec les indications du thermomètre à mercure.

On voit donc de combien il s'en faut que des appareils thermométriques basés sur la dilatation de liquides différents, bien que gradués en partant des mêmes points fixes, soient comparables entre eux. Placés dans des conditions thermiques identiques, dans des milieux ayant, d'après notre définition, la même température, les nombres de degrés qu'ils indiqueraient seraient inégaux; par contre, ils pourraient marquer les mêmes degrés sans que les températures fussent égales. Devant ces difficultés, on s'est demandé s'il est une substance, liquide ou gazeuse, qui puisse fournir, quand on prend ses variations de volume pour mesure des variations de température, des indications comparables entre elles. En d'autres termes, on s'est posé cette question : Existe-t-il un corps dont les dilatations soient proportionnelles aux quantités de chaleur qui les produisent, et s'il n'y en a pas qui jouisse absolument de cette propriété, quel est celui qui s'en écarte le moins?

Dès 1723, Taylor étudia la question en ce qui regarde les liquides. Prenant deux masses égales d'eau à des températures différentes, températures marquées par le thermomètre à expérimenter, il les mélangeait en prenant les précautions convenables pour éviter les pertes de chaleur. Le mélange devait, comme nous le verrons d'ailleurs plus loin, être à une température moyenne entre les extrêmes, à 15° par exemple si les masses mélangées étaient à 20° et à 10°. Les expériences de Taylor, depuis répétées par divers savants, ont prouvé que le thermomètre à mercure remplit cette condition jusqu'à 200°. Au delà, les indications sont trop élevées, d'où l'on conclut qu'une moindre quantité de chaleur est nécessaire alors pour déterminer la même dilatation.

Plus tard, Dulong et Petit, se fondant sur ces différences

entre les dilatations et les chaleurs absorbées, même quand on emploie le mercure, et sur cette idée que, tous les gaz se dilatant également entre des températures données, leur dilatation est indépendante de la nature de leurs molécules et de leur action réciproque, et dépend exclusivement de la quantité de chaleur absorbée, considérèrent le thermomètre à air comme préférable à tous les autres, et comme devant être employé exclusivement dans les déterminations scientifiques des températures. Quand nous parlerons de la mesure de la dilatation des gaz, nous dirons un mot de la construction du thermomètre à air et de son emploi, et nous verrons que ses avantages théoriques sur le thermomètre à mercure ne sont pas aussi grands que le crurent alors Dulong et Petit.

Pour le moment, bornons-nous à dire que les thermomètres à mercure s'accordent très sensiblement avec le thermomètre à air au-dessous de 100°. Au-dessus, ils marquent constamment une température plus élevée; vers 200°, l'avance est comprise entre 0°,5 et 2 degrés; elle varie de 4° à 10° au voisinage de l'ébullition du mercure, c'est-à-dire vers 360°. Comme l'usage du thermomètre à mercure est infiniment plus commode que celui du thermomètre à air, on peut se servir du premier pour les recherches les plus exactes jusqu'à 100° et même au delà, si l'on a comparé préalablement avec le thermomètre à air les indications du thermomètre qu'on emploie.

Les thermomètres à mercure, construits comme nous l'avons vu, sont-ils tous comparables entre eux? Placés dans des conditions physiques identiques, marqueront-ils tous exactement la même température? Poser cette question, c'est demander si le verre dont est formé le tube a une influence sur les indications thermométriques. On sait, en effet, que c'est la dilatation apparente du mercure, la différence entre la dilatation absolue de ce liquide et celle de son enveloppe, qui sert à définir l'unité thermométrique, le degré. Le mercure étant parfaitement pur, sa dilatation ne change point, mais celle du verre diffère d'un thermomètre à l'autre, selon la composition

et l'état moléculaire de cette substance. Les différentes espèces de verre ne se dilatent point également, et la loi de cette dilatation avec la température varie de l'une à l'autre. Enfin, le même verre, quand il a été soumis à certaines températures, subit dans sa structure moléculaire une modification qui change la capacité du réservoir et détermine un déplacement des points fixes.

Les recherches de V. Regnault ont prouvé que la nature chimique du verre a une notable influence sur les températures qui dépassent 100°. Il n'y a même pas rigoureusement accord de 0° à 100°, selon M. Is. Pierre, entre les indications de deux thermomètres à mercure, construits l'un avec du verre ordinaire, l'autre avec du cristal à base de plomb. Voici quelques chiffres empruntés à Regnault :

TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE A AIR	THERMOMÈTRE A MERCURE			
	EN CRISTAL	EN VERRE	EN VERRE VERT	EN VERRE DE SUÈDE
100°	100°	100°	100°	100°
120	120 12	119 25	120 08	120 04
140	140 29	139 84	140 21	140 11
160	160 52	159 74	160 40	160 20
180	180 80	179 63	180 60	180 33
200	201 25	199 70	200 80	200 50
220	221 82	219 80	221 20	220 75
240	242 55	239 98	241 60	241 16

La comparaison de ces nombres montre que ce sont les thermomètres en verre ordinaire qui accusent les moindres écarts avec les indications du thermomètre à air ; ceux en cristal sont les moins bons, surtout pour les températures élevées ; au delà de 240° le désaccord va en croissant, et à 350°, tandis qu'un thermomètre en verre marque 354°, un thermomètre en cristal donne 360°,50, soit 10 degrés et demi de plus que la véritable température. Pour remédier à ces inconvénients, il faut, si l'on veut avoir des résultats comparables, construire les thermomètres avec la même espèce de verre Dans les re-

cherches de précision, on se sert du thermomètre à air, ou, si l'on préfère l'emploi du thermomètre à mercure pour sa commodité, on le compare préalablement avec le thermomètre à air et l'on établit une table (ou bien l'on construit une courbe) qui permet de rectifier ses indications.

Un autre phénomène, qu'on observe à la longue, est de nature à altérer les indications du thermomètre : c'est le déplacement du zéro, qui monte graduellement au-dessus du point marqué sur l'échelle au moment de sa construction. Cette élévation, qui est commune à l'autre point fixe et par suite à tous les degrés de l'échelle, a été constatée dès 1823 par Flaugergues en France et Bellani en Italie. D'après Despretz, elle peut se continuer pendant quatre ou cinq années. Du reste, la variation des points fixes d'un thermomètre à mercure peut résulter des variations de température qu'il subit, lorsqu'elles s'écartent beaucoup au-dessus ou au-dessous de la moyenne. Une température très basse fait monter le zéro ; on observe une dépression si la température s'élève à 100°; et enfin, quand la température est très élevée, c'est une élévation des points fixes qui en est la conséquence. Si le thermomètre a été porté à 100°, la dépression temporaire du zéro n'est que de quelques dixièmes de degré. Si au contraire il a subi pendant un temps assez long une haute température, on constate une élévation considérable. Citons quelques faits : Person ayant chauffé longtemps à 440° trois thermomètres, leur point zéro s'est élevé à 12°, 15°, 17°. MM. Deville et Mascart ayant chauffé trois thermomètres pendant trois heures consécutives, à 166°, à 206° et à 266°, ont trouvé pour l'élévation de leurs zéros 11°,4, 12°,5 et 13°,5.

Des études récentes faites sur ce sujet par M. Crafts ont prouvé à ce physicien que la nature du verre influe sur la rapidité et sur l'étendue du déplacement ; que le point zéro, déplacé par l'action prolongée d'une haute température, tend à se fixer à sa nouvelle hauteur, et que le thermomètre devient plus stable sous l'influence de la chaleur à toute température inférieure.

Quelle est la cause de ces variations? On crut d'abord pouvoir les attribuer à l'action de la pression extérieure qui, agissant à la longue sur le réservoir, le comprimait et diminuait sa capacité; mais des expériences faites avec des thermomètres dont la tige restait ouverte ont donné les mêmes résultats, ce qui prouve que la pression n'est pas la cause du phénomène. D'ailleurs, elle ne peut rendre compte à la fois de la dépression temporaire du zéro et de son élévation. Tout s'explique au contraire si l'on admet avec Despretz qu'un corps solide dont les molécules ont subi un déplacement par une cause mécanique ou physique, dont le volume, par exemple, a été diminué ou augmenté d'une manière plus ou moins considérable par une force quelconque, conserve plus ou moins longtemps le volume nouveau après que cette force a cessé d'agir. Par le soufflage, les molécules du réservoir thermométrique ont été écartées; l'ébullition du mercure après le remplissage du thermomètre détermine un phénomène semblable. Ramené à des températures inférieures, le verre du réservoir ne reprend que lentement son état moléculaire primitif; il se contracte cependant à la longue comme par une sorte de trempe due au refroidissement, la capacité du réservoir diminue, ce qui explique l'élévation graduelle des points fixes. En l'exposant ensuite à des températures élevées, l'action de la chaleur favorise à nouveau le retour des molécules à leur position normale, et une nouvelle élévation des points fixes est constatée; mais à mesure qu'on obtient ces effets, si le refroidissement se fait très lentement, l'équilibre se rétablit, et les points fixes, comme M. Crafts l'a constaté, deviennent plus stables. La faible dépression temporaire observée quand on chauffe le thermomètre à 100°, vient de ce que la capacité du réservoir qui a ainsi augmenté ne revient que peu à peu à son volume normal. Enfin, la même cause montre pourquoi il y a aussi élévation des points fixes quand le thermomètre a été soumis à un froid prolongé : le réservoir contracté ne reprend pas tout de suite son volume primitif.

La sensibilité d'un thermomètre peut s'entendre, soit de la rapidité avec laquelle il prend la température des milieux où il est plongé, soit de la précision avec laquelle il donne les plus petites fractions de degré, c'est-à-dire indique de très faibles variations de température. Pour obtenir la première de ces deux qualités essentielles, il importe que la masse de mercure du réservoir soit aussi faible que possible, ou du moins que sa surface soit aussi grande que possible relativement à son volume. De là un double avantage : le thermomètre prend rapidement la température du corps avec lequel il est mis en contact; d'autre part, il ne modifie que d'une manière insensible cette même température. On arrive à ce résultat en donnant au réservoir une forme cylindrique allongée (la forme sphérique est la moins favorable); quelquefois on contourne en spirale le réservoir, de façon qu'avec une grande surface il n'occupe qu'une faible longueur.

Plus le réservoir est petit, plus il importe que le diamètre intérieur de la tige soit faible, afin que la seconde espèce de sensibilité soit plus grande. Dans ce cas, il arrive que la finesse de la colonne de mercure est telle, qu'on a besoin de se servir de la loupe pour en observer le niveau. On la rend plus apparente, en construisant des tubes dont la section soit une ellipse allongée au lieu d'un cercle, sans augmenter sa surface : vue ainsi dans sa plus grande largeur, la colonne mercurielle se distingue plus aisément. On obtient aussi le même résultat en appliquant sur le tube une bande d'émail qui forme un fond blanc, opaque, sur lequel se projette et se voit nettement le sommet de la colonne liquide.

Les thermomètres assez sensibles pour que la longueur d'un de leurs degrés comporte une division en dixièmes, auraient des dimensions démesurées et seraient d'un emploi fort incommode, s'ils embrassaient toute l'étendue de l'échelle thermométrique. On obvie à ce défaut en construisant des séries de thermomètres dont chacun a été gradué, par comparaison avec un thermomètre étalon, pour un petit nombre de degrés

de l'échelle : ce sont les *thermomètres à échelles fractionnées*. Avec dix thermomètres de ce genre, dont chacun comprendra 20 degrés, de 0° à 20°, de 10° à 30°, de 20° à 40°, etc., on pourra mesurer toute température comprise entre 0° et 110°. Dans chaque cas particulier, on emploiera celui qui comprend les limites probables de la température à observer. On en fabrique dont l'échelle est encore moins étendue; pour la pratique médicale, par exemple, un thermomètre qui donne la température entre 34° et 40° est très suffisant.

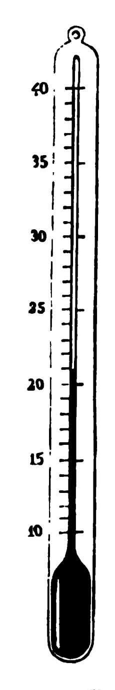


Fig. 16. — Thermomètre à échelle fractionnée.

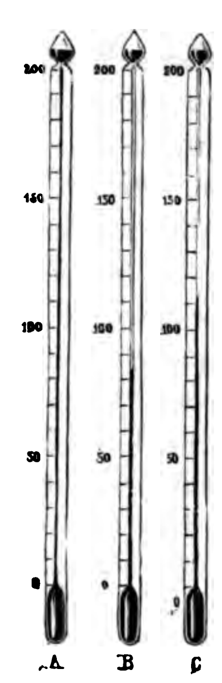


Fig. 17. — Thermomètres métastatiques.

On nomme thermomètre *métastatique* [1] un thermomètre construit de telle façon que ses indications, tout en comportant l'observation de petites fractions de degré, de dixièmes, de centièmes, par exemple, réunissent les avantages de la série de thermomètres à échelles fractionnées, dont il vient d'être question. L'échelle d'un thermomètre métastatique ne comprend qu'un fort petit nombre de degrés; mais la valeur absolue de ses indications peut changer au gré de l'observateur, comme si les points fixes pouvaient être transportés en un point quelconque du tube. Son réservoir est très petit, et la tige a un calibre intérieur assez fin pour que, la température variant de quelques degrés seulement, la colonne mercurielle en parcoure

1. Des deux mots grecs μετὰ et στάσις, dont le premier indique le *changement* et le second signifie *position*; c'est ici en effet le changement de position des points fixes.

toute la longueur. La quantité de mercure renfermée dans l'instrument est assez grande pour que, même à la plus basse température qu'on veuille lui faire mesurer, le liquide remplisse à la fois le réservoir, la tige tout entière et une partie d'une ampoule soudée à l'extrémité supérieure et communiquant avec la tige par un orifice rétréci. La tige est d'ailleurs divisée en parties égales, de longueur arbitraire, par exemple en 200 parties.

A chaque fois qu'on a besoin de se servir du thermomètre, il faut en régler la course, de manière que le niveau reste toujours compris dans la limite des températures qu'il s'agit de déterminer, entre 15° et 25° par exemple. On le plonge alors dans un bain d'une température constante un peu supérieure à 25°. Dès que l'équilibre est obtenu, on le retire, et quand il commence à se refroidir, on imprime au tube une secousse brusque qui sépare la colonne mercurielle du mercure de l'ampoule au point où elles communiquent. A partir de ce moment, le mercure de l'ampoule y demeure tout en se contractant, et le thermomètre est prêt pour les observations à faire dans les limites demandées. Seulement il faudra encore connaître : 1° quelle est la valeur d'une des divisions de l'échelle en degré ou fraction de degré ; 2° à quel degré du thermomètre étalon correspond l'une d'elles. On y parvient en plaçant le thermomètre métastatique dans le même bain que le thermomètre étalon et en notant le degré marqué par le premier avec la division correspondante. Puis, laissant le bain se refroidir d'un degré, une seconde lecture donnera tous les éléments de la question.

Ces opérations sont, comme on voit, assez longues et assez délicates, mais il ne faut pas oublier qu'elles sont nécessaires lorsqu'il s'agit de recherches précises, de déterminations rigoureuses qui exigent une approximation de la température en dixièmes et même en centièmes de degré centigrade. Dans les observations courantes, on se sert des thermomètres ordinaires, à mercure ou à alcool.

On emploie quelquefois, dans les recherches de physique, un appareil thermométrique qui diffère du thermomètre à mercure en ce qu'il n'a pas de tige et ne nécessite pas de graduation : c'est le *thermomètre à poids*. Il est formé d'un gros réservoir cylindrique soudé à un tube court, recourbé deux fois à angle droit (fig. 18), l'extrémité du tube effilée en pointe offrant une ouverture capillaire. On pèse le tube vide; puis on le remplit de mercure qu'on purge par l'ébullition, après quoi on le plonge dans la glace en fusion en maintenant l'orifice dans du mercure bien purifié. L'instrument se remplit ainsi de mercure à 0°; on le pèse en cet état, et la différence avec le poids du tube vide donne le poids du mercure seul à 0°. Cela fait, on porte l'appareil dans un bain à température connue et constante, en ayant soin de recueillir le mercure que la dilatation fait sortir de l'orifice. On pèse enfin le mercure sorti; il est clair que ce dernier poids rapporté au poids du mercure restant, c'est-à-dire $\frac{p}{P-p}$, représente la dilatation totale apparente du mercure pour le nombre de degrés qui exprime la température du bain, t[1]. En divisant par t, on trouvera la dilatation pour un degré, ou la dilatation apparente du mercure dans le verre du tube pour l'unité de volume et pour un degré. Cet élément une fois connu, on pourra, en recommençant l'opération que nous venons de décrire, trouver au contraire la température inconnue du bain où l'on plongera l'appareil.

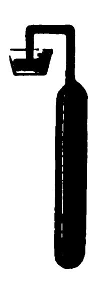


Fig. 18. Thermomètre à poids.

L'avantage principal du thermomètre à poids vient de la faible longueur de sa tige, qui permet de le plonger entière-

1. Pour plus de clarté, supposons qu'on ramène l'appareil tout entier à 0°. Le mercure, en se contractant, laissera un vide dont le volume sera soit la contraction apparente du mercure restant de t^0 à 0°, soit sa dilatation de 0° à t^0. Or les volumes du mercure à 0° peuvent être remplacés par leurs poids : ainsi p représentera la dilatation du volume $P-p$ pour t degrés; $\frac{p}{P-p}$ sera la dilatation de l'unité de volume et $\frac{p}{(P-p)t}$ sera celle de cette unité pour 1°. C'est un nombre qui, pour le verre, est à peu près égal à la fraction $\frac{1}{6480}$.

ment dans les milieux dont on veut avoir la température. On évite en outre ainsi les erreurs de graduation; mais les opérations sont plus longues et exigent des balances très précises.

§ 6. THERMOMÈTRES DIFFÉRENTIELS, MÉTALLIQUES, A MAXIMA ET A MINIMA.

Les appareils que nous venons de décrire sont seuls usités, avec le thermomètre à air dont il sera question plus tard, pour les recherches précises dans les laboratoires de physique et lorsqu'on veut déterminer des températures absolues. Quand il s'agit de constater de rapides variations de température, ou d'évaluer de simples différences, ou encore de savoir à quelles températures extrêmes a été soumis un milieu pendant un temps donné, on emploie divers instruments que nous allons passer en revue rapidement.

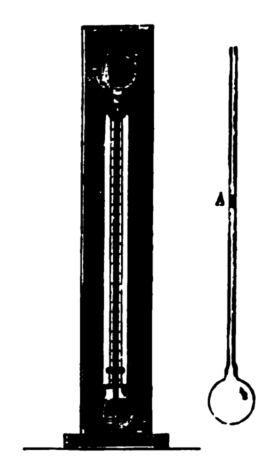


Fig. 19. — Thermomètres à air de Cornélius Drebbel et de Galilée.

On attribue à Galilée et à Cornélius Drebbel l'invention des premiers thermomètres à air, qui n'étaient à vrai dire que de simples *thermoscopes*. L'un d'eux (fig. 19) consiste en un tube à réservoir renfermant une petite colonne liquide A qui sépare l'air du réservoir de l'air extérieur. Quand la température augmente, l'air contenu dans la boule du thermomètre s'échauffe, se dilate et chasse l'index vers l'extrémité ouverte du tube. L'autre appareil est aussi formé d'un tube à réservoir d'air semblable au premier, mais son extrémité ouverte plonge dans un liquide contenu dans un vase ouvert; par le refroidissement, l'air diminue de volume, et par suite son élasticité devient moindre, de sorte que le liquide, qui subit toujours la pression atmosphérique extérieure, s'élève plus ou moins haut dans le tube. Ce second appareil était très répandu au siècle dernier. Ces

deux thermomètres se graduent maintenant par comparaison avec un thermomètre à mercure : on marque les points où s'arrête le liquide à deux températures différentes, et on partage l'intervalle en autant de parties égales qu'il comprend de degrés. Mais l'un et l'autre sont affectés aussi par les changements de la pression atmosphérique, et dès lors ne sont pas susceptibles d'une grande précision. Leur qualité consiste surtout dans la rapidité de leurs indications.

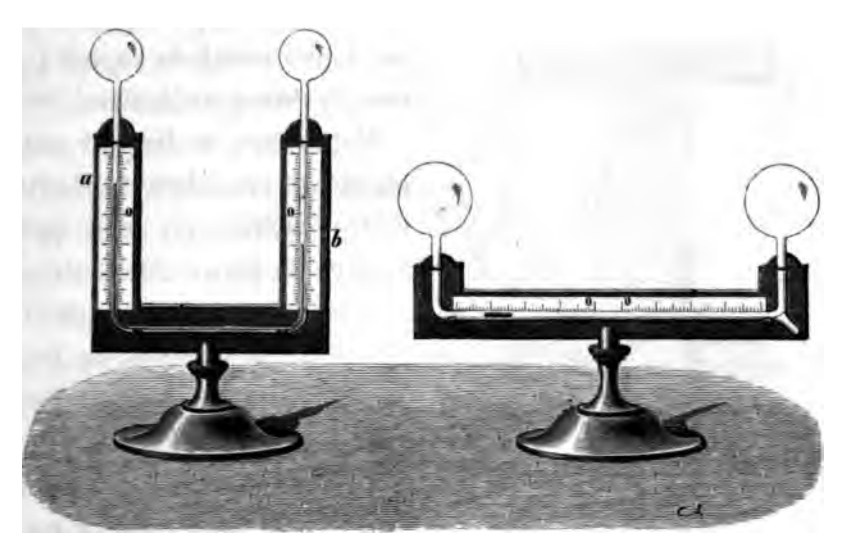


Fig. 20. — Thermomètre différentiel de Leslie.

Fig. 21. — Thermomètre différentiel de Rumford.

Leslie et Rumford ont, chacun de leur côté, imaginé des thermomètres fondés sur la dilatation de l'air, mais n'offrant pas les inconvénients des précédents, c'est-à-dire n'étant pas influencés par la pression atmosphérique. Tous deux sont formés d'un tube doublement recourbé, terminé à chaque extrémité par une boule ou réservoir. Dans le thermomètre de Leslie (fig. 20) le tube renferme une colonne liquide d'acide sulfurique coloré en rouge, dont les niveaux sont les mêmes en chaque branche, quand la température des deux boules est égale[1].

1. Cela suppose que les masses d'air renfermées dans les deux boules sont parfaitement égales. On arrive par tâtonnements à ce résultat quand on construit l'instrument.

On marque 0 à ce niveau commun. Si l'on chauffe alors un seul des deux réservoirs, la dilatation de l'air qu'il contient refoule le liquide; le niveau de la branche correspondante s'abaisse en *b*, tandis qu'il s'élève dans l'autre branche en *a*; et la hauteur au-dessus du zéro marque la différence de température des réservoirs, si l'instrument a été gradué par comparaison avec un thermomètre à mercure. Le choix du liquide formant la colonne-index n'était pas indifférent. Leslie a pris l'acide sulfurique, parce qu'il ne donne point de vapeurs aux températures ordinaires.

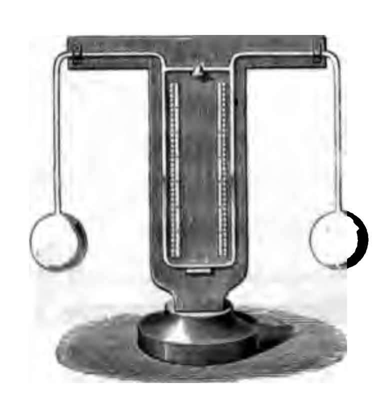


Fig. 22. — Thermomètre différentiel de Leslie modifié par Mathiessen.

Mathiessen a disposé autrement les branches du thermomètre différentiel, ainsi que le montre la figure 22. Cette disposition permet de plonger l'une ou l'autre des boules ou toutes les deux dans un vase et d'appliquer l'instrument aux liquides.

Le thermomètre à air de Rumford diffère du précédent en ce que la colonne liquide est remplacée par un index qui occupe le milieu de la branche horizontale du tube quand il y a égalité de température entre les deux réservoirs, les masses d'air contenues dans chaque moitié de l'appareil étant égales de part et d'autre. Si l'un des réservoirs s'échauffe plus que l'autre, la dilatation de l'air fera marcher l'index dans la partie horizontale du tube, du côté de la boule la plus froide, et l'on mesurera la différence des températures par le nombre des divisions que cet index aura parcourues à partir du zéro. Rumford employait un index d'alcool; mais comme ce liquide est très volatil, les indications de l'appareil étaient peu sûres, et ne pouvaient accuser que l'égalité des températures. Il lui donnait le nom de *thermoscope*.

Ces deux instruments marquent ainsi des différences de

température : c'est pourquoi on les appelle *thermomètres différentiels*. Mais ils peuvent donner aussi les températures absolues ; dans ce cas, on enveloppe l'une des boules de glace en fusion, ce qui maintient sa température à zéro.

La dilatation des corps solides peut aussi servir à mesurer la température. Les appareils que nous avons décrits plus haut sont fondés sur l'inégalité de dilatation des liquides ou des gaz et des enveloppes qui les renferment : cette inégalité, déjà sensible pour les liquides, devient considérable dans les gaz. C'est aussi sur l'inégalité de dilatation des différents corps solides qu'est basée la construction des thermomètres métalliques représentés dans les figures 24, 25 et 26. Deux lames métalliques, l'une de cuivre, l'autre de zinc par exemple, soudées l'une à l'autre dans toute leur longueur de manière à former une barre droite, s'allongent inégalement si on élève leur température : la barre se courbe alors comme le montre la figure 23, le zinc, le plus dilatable des deux métaux, formant le côté convexe, et le cuivre le côté concave. En revenant à sa température primitive, elle reprend sa forme rectiligne, pour se courber en sens inverse, si on la soumet ensuite à un refroidissement.



Fig. 23. — Inégale dilatation de deux métaux différents pour une même température.

Le thermomètre métallique à cadran se compose d'une lame courbe de cuivre et d'acier soudés. L'une des extrémités est fixe, et l'autre porte un style dont la pointe peut parcourir les divisions d'un cadran. Tel est le thermomètre métallique de Regnier (fig. 24). Ou bien encore, l'extrémité mobile de la double lame s'appuie sur le petit bras d'un levier, dont le grand bras, en forme de secteur denté, s'engrène au pignon de l'aiguille (fig. 25). Les variations de la température augmentent

ou diminuent la courbure de la lame, et dès lors font mouvoir, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, le levier et par suite l'aiguille. Le cadran a été divisé en degrés par comparaison avec un thermomètre à mercure.

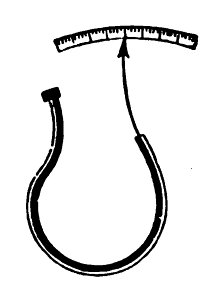


Fig. 24. — Thermomètre métallique de Regnier.

Dans le thermomètre métallique de Bréguet (fig. 26), la lame est formée de trois rubans d'argent, d'or et de platine, dont le système est contourné en hélice, l'argent, le plus dilatable des trois métaux, formant la surface intérieure des spires[1]. L'hélice est suspendue verticalement, et son extrémité inférieure supporte une aiguille horizontale qui parcourt les divisions d'un cadran. La température s'élève-t-elle, la courbure des spires diminue sous l'influence de la plus grande dilatation



Fig. 25. — Thermomètre métallique à cadran.



Fig. 26. — Thermomètre métallique de Bréguet.

de l'argent, et l'aiguille marche dans un sens; le contraire arrive, si la température s'abaisse. Comme la masse de l'hélice est extrêmement faible, elle se met très rapidement en équilibre de température avec l'air qui l'environne : le thermomètre

1. L'interposition de l'or entre les deux métaux dont la dilatabilité est la plus inégale, a pour objet d'éviter la rupture ou tout au moins la séparation des parties soudées, accident qui pourrait résulter de l'emploi exclusif du platine et de l'argent.

de Bréguet est donc très sensible, et très propre à accuser les légères et brusques variations de la température.

Les thermomètres *à maxima* et *à minima* sont des instruments ayant pour objet, comme l'indiquent leurs noms, de faire connaître soit la température la plus élevée, soit la température la plus basse qu'ait subie, dans un intervalle de temps donné, le milieu au sein duquel ils se trouvent. Ils sont usités principalement dans les observatoires météorologiques, où ils dispensent le physicien d'une observation continue ou du moins fréquemment répétée.

La figure 27 représente les thermomètres à maxima et à minima imaginés par Rutherford. Les deux instruments, dont le premier A est un thermomètre à mercure et le second B un thermomètre à alcool, sont disposés horizontalement sur une même planchette. A l'intérieur du thermomètre à maxima, repose, sur la surface du mercure, un petit cylindre d'acier ou d'émail, que le liquide pousse devant lui tant que la température s'élève, mais qu'il laisse en place au point le plus éloigné de sa course quand la température vient à baisser. La base la plus voisine du mercure indique évidemment la température maximum. Le mouvement de l'index tant que la colonne mercurielle monte, ainsi que son arrêt quand elle vient à rétrograder, sont également basés, comme on voit, sur la propriété du mercure de ne pas mouiller le cylindre d'acier, de ne point adhérer à sa surface. C'est une propriété opposée qui a fourni à Rutherford le moyen de construire son thermomètre à minima. Ce dernier est en effet un thermomètre à alcool, dans le tube duquel se trouve un cylindre en émail que l'alcool mouille et laisse en place quand la température s'élève, et qu'il entraîne au contraire avec lui quand elle s'abaisse. Le minimum est donc

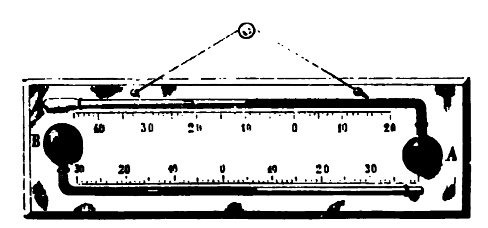


Fig. 27. — Thermomètre à maxima et à minima de Rutherford.

donné par la base du cylindre opposée au réservoir. Quand on veut installer l'instrument pour une observation, il faut avoir soin de ramener les deux index aux extrémités de chaque colonne liquide : l'un repose alors sur le mercure, et l'autre, noyé dans l'alcool, affleure la surface du liquide par sa base la plus éloignée du réservoir.

La figure 28 montre comment on construit aujourd'hui le thermomètre à minima de Rutherford.

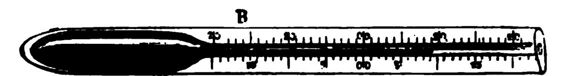


Fig. 28. — Thermomètre à minima de Rutherford.

On se sert aussi comme thermomètre à maxima de l'instrument représenté dans la figure 29. C'est un thermomètre à mercure ordinaire dont la tige est contournée un peu au-dessus du réservoir, et rétrécie en A au point que, lorsque le mercure se contracte sous l'influence du refroidissement, la colonne située dans la tige ne peut plus rentrer dans le réservoir. Son extrémité reste donc au point le plus élevé de son ascension. Tant que le mercure se dilate, au contraire, sa force d'expan-

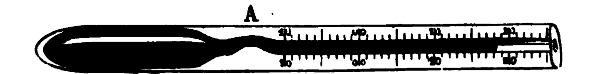


Fig. 29. — Thermomètre à maxima de Negretti et Zambra.

sion est suffisante pour que le liquide du réservoir passe dans la tige, malgré l'extrême finesse du diamètre de la partie rétrécie. Cet instrument a été imaginé par Negretti et Zambra.

Le thermomètre de Six, modifié par Bellani, réunit en un seul appareil les thermomètres à maxima et à minima de Rutherford. Il consiste en un thermomètre à alcool à grand réservoir, à tige doublement recourbée et qui contient une colonne de mercure dans les deux branches verticales du coude inférieur. L'alcool est séparé ainsi en deux parties par le mercure; deux flotteurs en fer reposent sur les deux niveaux de ce der-

nier, et par leurs mouvements, par les points extrêmes où ils parviennent, indiquent, l'un la température la plus basse, l'autre la température la plus élevée de la période de temps pendant laquelle l'instrument aura été mis en observation.

Pour observer les températures maximum et minimum à certaines profondeurs, dans l'eau de la mer ou des lacs, dans les puits artésiens, on emploie les thermomètres à déversement, parmi lesquels nous décrirons ceux de Walferdin, les plus appréciés par les physiciens.

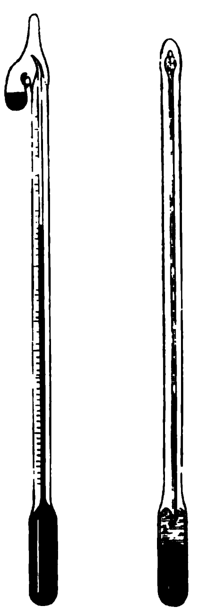


Fig. 30. — Thermomètres à maxima et à minima de Walferdin.

Le thermomètre à maxima est construit comme un thermomètre à mercure ordinaire; mais l'extrémité du tube est effilée en pointe et enveloppée d'une panse latérale qui contient une certaine quantité de mercure. Quand on veut observer, on chauffe le réservoir jusqu'à ce que le mercure remplisse entièrement le tube; puis on renverse l'instrument, le réservoir en haut; le mercure de la panse affleure la pointe, et en laissant refroidir à une température plus basse que celle des maxima qu'on peut avoir à déterminer, le tube reste toujours rempli entièrement de mercure, grâce à l'affleurement de la pointe avec le mercure de la panse. On porte alors l'instrument, ainsi amorcé, dans le milieu à observer. Tant que la température s'élève, le mercure se déverse par la pointe, et au moment du maximum le tube sera encore rempli. L'instrument retiré du milieu, on trouvera la température du maximum en échauffant le thermomètre dans l'eau, jusqu'à ce que la colonne de mercure affleure de nouveau au sommet de la pointe.

Dans le thermomètre à minima, la pointe est en bas, près du réservoir, qui renferme du mercure et une certaine quantité d'alcool. Quand on veut observer, on refroidit l'instrument à une température inférieure à celle du minimum supposé; puis

on le renverse et une certaine quantité de mercure entre dans le tube par la pointe. Le thermomètre étant plongé dans le milieu à observer, tant que la température s'abaisse, l'index de mercure du tube descend, et une partie du mercure tombe dans le réservoir. Puis il remonte, si la température s'élève. L'instrument retiré, on le plonge dans un bain qu'on refroidit jusqu'à ce que le mercure de l'index affleure de nouveau à l'extrémité de la pointe.

Lorsque nous parlerons des températures de la mer, nous dirons quelles précautions exige l'emploi des thermomètres à déversement.

§ 7. MESURE DES HAUTES TEMPÉRATURES. — PYROMÉTRIE.

Les limites extrêmes des températures que le thermomètre à mercure permet de mesurer sont, au-dessous de zéro —40°, au-dessus de zéro + 360°, puisque la première est celle de la congélation du mercure, et la seconde celle de son point d'ébullition. En réalité, les limites véritables sont —36° et + 350°. A 36°, le mercure éprouve déjà des contractions irrégulières et ses indications deviennent incertaines. On évite d'aller jusqu'à 360°, où l'ébullition pourrait briser le tube. Le thermomètre à alcool permet d'apprécier les températures inférieures à —36°. Il reste donc à trouver le moyen de mesurer les températures qui surpassent celle de l'ébullition du mercure. Les instruments servant à cet objet ont reçu le nom commun de *pyromètres*. Nous décrirons plus tard ceux de ces appareils, très différents des thermomètres ordinaires, qu'emploient les physiciens pour leurs recherches : ce sont les *pyromètres à air* ou *à vapeur d'iode*. Nous ne parlerons dans ce paragraphe que des pyromètres usités dans l'industrie, et qui servent pour connaître la température des fours à porcelaine, des fourneaux métalliques, etc.

Un des plus anciens et des plus répandus est le *pyromètre*

de Wedgwood, qui porte le nom d'un célèbre potier anglais, son inventeur. Il est basé sur une propriété de l'argile de se contracter d'autant plus, que la température à laquelle elle est soumise est plus élevée.

Voici quelle est la disposition de ce pyromètre. On fixe sur une plaque métallique deux règles d'acier faisant entre elles un très petit angle[1] et laissant de la sorte dans leur intervalle une rainure de largeur décroissante. L'une des règles est divisée en parties égales, et c'est cette graduation qui sert de mesure au retrait de l'argile, en indiquant à quel point de l'échelle ou de la rainure peut pénétrer un cylindre d'argile, lorsqu'il a



Fig. 31. — Pyromètre de Wedgwood.

pris la température du foyer où il a été plongé. Le zéro de la division se trouve à la base la plus large de la rainure, qui comprend dans toute sa longueur 240 divisions égales. Pour donner moins de longueur à l'appareil, on emploie ordinairement trois règles, ainsi que le montre la figure 31. L'espace angulaire compris entre les deux premières n'est autre chose que le prolongement de celui qui existe entre la seconde et la troisième règle.

Pour opérer, on se sert de petits cylindres d'argile, pétris

1. L'angle en question était de moins d'un demi-degré dans le pyromètre employé par Wedgwood. La longueur totale des règles divisées mesurait 305 millimètres; la largeur de la rainure à la base était de 12^{mm},7 et celle de la rainure au sommet de 8^{mm},5. Ces dimensions donnent 25′40″ pour l'angle des deux règles.

avec de la pâte bien homogène, puis desséchés par l'exposition à la température du rouge sombre. On les use à la lime, jusqu'à ce qu'ils aient un diamètre tel, que, placés en long entre les règles, ils pénètrent jusqu'au zéro de la division. Pour obtenir la température d'un foyer, d'un four à porcelaine par exemple, on y plonge un de ces cylindres ; dès qu'il y a séjourné un temps assez long pour en prendre la température, on le retire, on le laisse refroidir, et alors on le fait glisser entre les règles du pyromètre. Admettons qu'il parvienne jusqu'à la 48ᵉ division : on dira alors que la température du four est de 48° au pyromètre.

Il reste à savoir dans quelles conditions les indications du pyromètre sont comparables entre elles, et à quels degrés du thermomètre à mercure ou du thermomètre à air elles correspondent. Il paraît évident que la première question dépend uniquement de la composition de l'argile employée : il faut que pour tous les cylindres cette composition soit la même. Voici celle qu'employait Wedgwood : sur 100 parties, l'argile renfermait 44,29 d'alumine, 47,35 de silice et 8,36 d'eau[1]. La seconde question est plus délicate. Pour la résoudre, Wedgwood mesura la dilatation d'un cylindre d'argent, au moyen d'une jauge en terre de pipe qui était la reproduction d'une partie du pyromètre, en portant sa température de 100° à 360°. Il trouva ainsi que le cylindre d'argent rétrogradait de 23,4 divisions du pyromètre pour un accroissement de température de 260° : c'était environ 11°,11 par division. Cela posé, en portant successivement le cylindre d'argent et un cylindre d'argile dans un foyer, il trouva que le cylindre d'argile avançait de 2,25 divisions, tandis que celui d'argent reculait de 66. En admettant une dilatation constante de l'argent, la température du foyer était de 66 × 11°,11 centigrades, + 10° que possédait le cylindre d'argent au moment de l'immersion, soit 743°.

1. « Wedgwood composait ses billes pyrométriques avec un mélange à parties égales d'argile de Cornouailles et d'alumine calcinée provenant de la décomposition de l'alun par l'ammoniaque, et lavant à l'eau bouillante. » (*Dictionn. des arts et manufactures* de Laboulaye.)

Une seconde opération donna 1032° pour 6,25 divisions du pyromètre. D'où Wedgwood concluait que la différence, soit 4 divisions, équivalait à la différence des températures calculées ou bien à 289°. Cela fait une division du pyromètre pour 72 degrés centigrades.

Malheureusement, cette détermination repose sur une hypothèse inexacte, celle de l'invariabilité de la dilatation de l'argent quelle que soit la température. Dès lors les indications du pyromètre que nous venons de décrire ne peuvent se comparer à celles des thermomètres ordinaires. Son usage, très précieux dans la pratique, où ce sont les effets que l'on constate, n'a donc pas de valeur scientifique. Ce n'est en réalité qu'un *pyroscope*.

Il en est de même de l'appareil imaginé par Brongniart et dont ce savant se servait, à la manufacture de Sèvres, pour connaître la température des fours à porcelaine. Une barre métallique en fer, argent ou platine est logée dans une rainure pratiquée dans une pièce en porcelaine AB, fixée dans le four. En se dilatant sous l'influence de la chaleur, cette barre pousse une tige *ab*, en porcelaine, dont une extrémité est extérieure au four, et vient buter contre la petite branche d'un levier coudé. Le mouvement se transmet, en s'amplifiant, à l'autre branche en forme d'aiguille, qui parcourt les degrés d'un arc de cercle. On sait par expérience à quelles divisions de cette échelle arbitraire correspondent les températures propres à toutes les opérations de cuisson du four, et cela suffit. Mais des appareils de ce genre ne permettent pas d'évaluer ces mêmes températures en degrés centigrades.

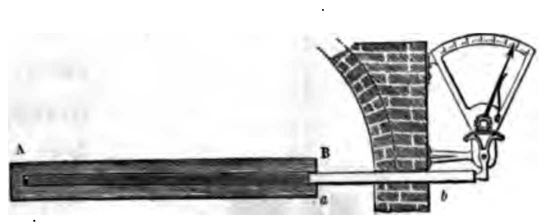


Fig. 32. — Pyromètre de Brongniart.

Le pyromètre de Main, usité depuis quelque temps en Angleterre, consiste en un vase formé de trois cylindres concentriques en cuivre. Le cylindre central contient un thermomètre

à mercure dont la tige et l'échelle sont extérieures au vase; le cylindre extérieur A est garni d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur. Enfin, le cylindre intermédiaire B, ou l'espace annulaire compris entre les deux premiers, communique au four ou foyer dont on veut connaître la température, par un tuyau E qui sert de passage à l'air chaud; ce dernier s'échappe au dehors par un orifice conique D, après avoir communiqué au cylindre intérieur, ainsi qu'au thermomètre qu'il renferme, une portion de sa chaleur. Plus l'air chaud du four est à une température élevée, plus la chaleur communiquée sera grande, plus les indications thermométriques seront élevées ellesmêmes. Quant à la graduation du pyromètre (ou au rapport qui existe entre les températures du four et les températures correspondantes du thermomètre à mercure), on l'obtient à l'aide des pyromètres métalliques : ce qui revient à dire qu'il n'est pas possible d'exprimer avec exactitude les températures en degrés centigrades.

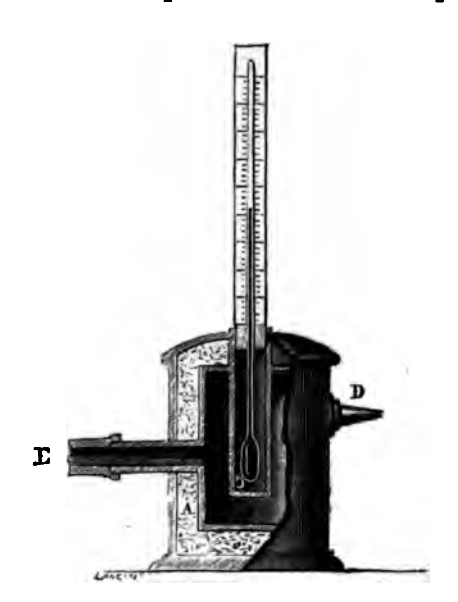


Fig. 33. — Pyromètre de Main.

Plus tard, nous parlerons des pyromètres à air et de ceux dont la construction et l'emploi reposent sur des déterminations calorimétriques et dès lors permettent une évaluation très approchée des hautes températures; nous dirons aussi un mot des méthodes optiques ou spectroscopiques proposées par divers physiciens et récemment mises en usage dans le but de résoudre le même problème.

§ 8. NOTIONS HISTORIQUES SUR LES PROGRÈS DE LA THERMOMÉTRIE.

Les détails dans lesquels nous sommes entrés au sujet de la construction et de la graduation des divers appareils thermométriques, peuvent donner une idée des exigences de la science actuelle sur le point important de la détermination précise des températures. Aujourd'hui encore le problème n'est pas complètement résolu pour les températures élevées. Mais si l'on compare les procédés et les instruments dont se servent les physiciens contemporains, avec ceux qui ont été en usage dans les deux siècles qui précèdent le nôtre, on se rendra compte des progrès accomplis.

C'est aux dernières années du seizième siècle, ou aux premières du dix-septième, que l'on fait remonter l'invention du thermomètre. Galilée, selon les uns, Cornélius Drebbel suivant d'autres, en auraient eu la première idée. On cite encore les noms de Van Helmont, de Sanctorius, de Bacon, de Fludd, de Sarpi, de Borelli, parmi ces inventeurs. Quoi qu'il en soit, leurs thermomètres, ou plutôt leurs thermoscopes, étaient basés sur les effets de la dilatation de l'air sous l'influence de la chaleur. Voici, d'après l'*Encyclopédie de D'Alembert*, la description et la figure de l'instrument de Drebbel :

« Dans un tuyau BC (fig. 34, 1) auquel est attachée une boule de verre AB, on met une quantité d'eau commune mêlée d'eau régale pour empêcher qu'elle ne se gèle l'hiver ; on ajoute à cette mixtion une teinture de vitriol, dissous pour la rendre verte. En emplissant le tuyau, il faut avoir soin de laisser dans la boule et dans le tuyau assez d'air pour qu'il puisse remplir précisément la boule au plus fort de l'hiver, lorsque l'air se trouve le plus condensé, et qu'il ne puisse point chasser du tuyau toute la liqueur dans les plus fortes chaleurs de l'été, lorsque l'air est au plus haut degré de sa raréfaction. A l'autre extrémité du tuyau est attachée une autre boule de verre CD, ouverte du côté de l'air en D : des deux côtés du tuyau on

applique une échelle, ou une platine EF, sur laquelle on marque les degrés, ou un certain nombre de lignes également distantes les unes des autres. Dans cet état, quand l'air qui environne le tuyau devient plus chaud, l'air renfermé dans la boule et dans le haut du tuyau, venant à se dilater, chasse la liqueur dans la boule inférieure, et par conséquent fait descendre la liqueur; au contraire, quand l'air qui environne le tuyau devient plus froid, l'air renfermé dans la boule venant à se condenser, fait monter la liqueur. »

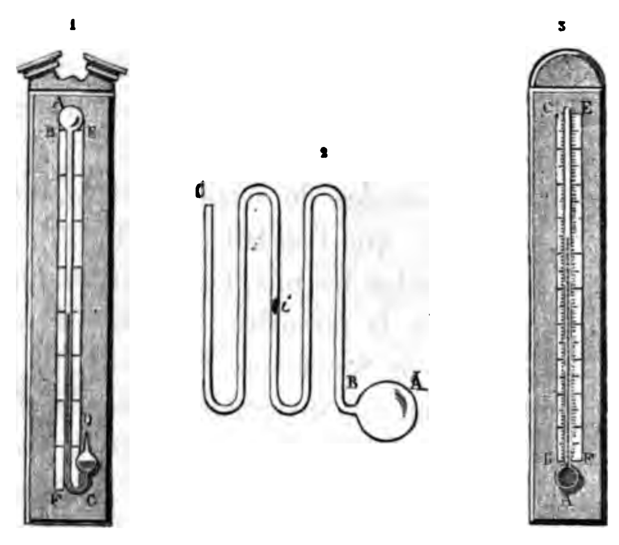


Fig. 34. — Thermomètres usités au siècle dernier : 1, thermomètre de C. Drebbel; 2, de Galilée; 3, de Florence.

Le thermoscope ainsi décrit est celui qu'on attribue à C. Drebbel. Voici comment se construisait celui de Galilée (fig. 34, 2) : « C'est de la même manière, et avec les mêmes précautions, que l'on met une petite quantité de mercure ou de vif-argent, qui n'excède point l'épaisseur d'un pois, dans un tuyau BC, que l'on coude en plusieurs endroits, afin qu'on puisse le manier plus aisément, et qu'on risque moins de le casser; on divise ce tuyau en un certain nombre de parties gales qui servent d'échelle. Dans cet état, les différentes approches du mercure vers la boule A marqueront les accroissements et les différents degrés de chaleur. »

Le rédacteur de l'article, qui n'est autre que D'Alembert, ajoute : « Les défauts de ces deux thermomètres consistent en ce qu'ils sont sujets à recevoir les impressions d'une double cause ; car ce n'est pas seulement l'augmentation de la chaleur, mais aussi une augmentation du poids de l'atmosphère, qui peut faire monter la liqueur dans le premier, et le mercure dans le second de ces thermomètres ; et d'un autre côté, ce peut être la diminution du poids, aussi bien que la diminution de la chaleur de l'atmosphère, qui fera descendre la liqueur et le mercure dans les deux thermomètres. »

La célèbre société scientifique de Florence, connue sous le nom d'*Académie del Cimento*, construisit la première un thermomètre basé sur la dilatation des liquides et qui, sous la dénomination de *thermomètre commun* ou *de Florence*, devint le type des appareils modernes. Ce n'était autre chose qu'un tube soudé à une boule dont l'intérieur était rempli d'esprit-de-vin rectifié ou d'alcool coloré en rouge par des morceaux de turmeric. « De cet esprit-de-vin ainsi teint et préparé on emplit une boule de verre AB (fig. 34, 3) et un tuyau BC, et afin que tout l'esprit-de-vin ne descende point dans la boule pendant l'hiver, il est à propos de mettre cette boule dans un petit tas de neige mêlée de sel ; ou si cet instrument se fait pendant l'été, on met la boule dans de l'eau de source imprégnée de salpêtre, afin que, l'esprit-de-vin étant extrêmement condensé, on puisse voir à quel point il s'abaissera dans le plus fort de la gelée. Si l'esprit-de-vin monte à une trop grande hauteur au-dessus de la boule, il faut en ôter une partie ; et afin que le tuyau ne soit pas excessivement long, il est à propos de mettre la boule, remplie de son esprit-de-vin, dans de l'eau bouillante, et de marquer le point le plus éloigné où monte pour lors l'esprit-de-vin. C'est à ce point que le tuyau doit être fermé hermétiquement par la flamme d'une lampe ; et des deux côtés du tuyau on applique une échelle comme aux autres thermomètres. » (*Encyclopédie*.)

Après avoir ainsi décrit les thermomètres usités jusqu'alors,

D'Alembert passe en revue quelques-uns de leurs défauts; mais il insiste surtout, et on le comprend, sur l'impossibilité de comparer leurs indications. « Un autre défaut considérable, dit-il, c'est que ces thermomètres ne sont point comparables entre eux[1]. A la vérité, ils marquent les différents degrés de chaud et de froid, mais chacun ne les marque que pour lui-même et à sa façon particulière. De plus, ils ne partent point de quelque point fixe de chaleur ou de froid, et c'est encore un défaut commun à tous les thermomètres. Il en est de ces instruments comme de deux pendules qui, pour n'avoir point été réglées d'abord sur l'heure du soleil, marqueront à la vérité qu'il y a une, deux, ou plusieurs heures de passées, mais ne marqueront point l'heure précise du jour ou du soleil. »

La nécessité de partir de points fixes pour graduer les thermomètres et les rendre comparables avait été sentie par divers physiciens. Robert Boyle avait proposé, vers le milieu du dix-septième siècle, de prendre pour premier point la congélation de l'eau, et divers physiciens adoptèrent pour second point la fusion du beurre. Renaldini graduait son instrument en le plongeant dans la glace fondante, puis dans des mélanges en proportion déterminée de glace et d'eau bouillante. En 1701, Newton marquait 0° à la fusion de la glace et 12° à la température du sang humain. Nous avons vu, en parlant de l'échelle de Fahrenheit, quels étaient les points fixes adoptés par ce physicien : la température de l'eau bouillante était le point le plus élevé. Enfin, en 1730, Réaumur adopta pour son thermomètre, dont l'usage a été si longtemps général, la glace fondante et l'eau bouillante. Mais ce savant eut le mérite de définir avec plus de précision qu'on ne l'avait fait jusqu'alors l'unité de température, le degré. Il divisait avec soin les tubes de ses thermomètres en parties d'égale capacité, puis il se ser-

1. Il paraît cependant que les académiciens de Florence construisaient des instruments qui marchaient d'accord. Ils étaient sans doute gradués les uns sur les autres; M. Libri (cité par Daguin) a reconnu qu'ils marquaient 13°,5 à la température de la glace fondante. Leur zéro correspondait à celle des caves.

vait, pour les remplir, d'esprit-de-vin dont la dilatation fut telle que, son volume étant 1000 au point de congélation de l'eau, ce volume devint 1080 à la chaleur de l'eau bouillante. Le degré était donc la 80e partie de la dilatation totale du liquide entre les deux points fixes. Ce fut là l'origine de l'échelle dite de Réaumur.

Vint ensuite le Suédois Celsius, qui proposa, en 1742, la division centésimale[1], entre les mêmes points fixes de la glace fondante et de l'eau bouillante.

Un autre progrès important de la thermométrie, qui date également du milieu du dix-huitième siècle, fut la substitution du mercure à l'alcool. Musschenbroek critiqua l'emploi de ce dernier liquide, qui perd, dit-il, à la longue sa vertu expansive et dont le point d'ébullition est en outre trop peu élevé. Le mercure a d'ailleurs l'avantage de pouvoir toujours être obtenu pur. « Il reste toujours le même quoiqu'on l'ait gardé pendant plusieurs années, et il se raréfie toujours également quelque vieux qu'il soit. » Les thermomètres d'Amontons, de Fahrenheit, de Delisle furent construits avec du mercure.

C'est ainsi que peu à peu la thermométrie, si défectueuse et si imparfaite à l'origine, devint de plus en plus précise, jusqu'à ce que, grâce aux perfectionnements apportés à ses procédés par des physiciens tels que Petit et Dulong, elle eût acquis le degré de rigoureuse exactitude qu'elle possède aujourd'hui, au

1. C'est généralement à ce savant qu'on attribue la division centésimale. Toutefois, d'après une notice historique due à M. Lafon, directeur de l'observatoire météorologique de Lyon, un membre de l'académie de Lyon, nommé Christin, aurait fait simultanément en 1742 la même innovation dans l'échelle thermométrique. « Christin, dit-il, ayant versé dans un tube terminé par une boule une quantité de mercure dont le volume pouvait être représenté par 6600 à la température de la congélation de l'eau, trouva que ce volume devenait 6700 quand le tube était plongé dans l'eau bouillante. Le mercure s'étant dilaté de 100 parties, Christin trouva tout naturel de diviser en 100 parties égales l'espace parcouru par le mercure, en ajoutant que ces nouvelles divisions, plus petites que celles de Réaumur, seraient plus en harmonie avec les sensations causées par les variations de température. Telle fut l'origine du thermomètre centigrade, qui ne tarda pas à se répandre sous le nom de *thermomètre de Lyon*. Quatre ans après, c'est-à-dire en 1746, Cassini, qui était l'opticien en renom à Lyon, en avait vendu 700 à Paris, autant en Provence et en Dauphiné; à Londres même il était très répandu, d'après Deluc. » (Cité par la *Nature* du 9 janvier 1875.)

moins dans les limites de température comprises entre le point de congélation et le point d'ébullition du mercure. On peut dire que, sans ces perfectionnements, la science de la chaleur n'aurait pu se développer et que, du même coup, les autres parties de la Physique seraient restées imparfaites dans un grand nombre de leurs branches. Le thermomètre est en effet pour la Physique un instrument aussi important que la balance pour la Chimie.

CHAPITRE III

DILATATION DES SOLIDES

§ 1. EFFETS DE LA DILATATION. — DILATATION DES SOLIDES, LINÉAIRE, SUPERFICIELLE ET CUBIQUE.

Tout corps se dilate ou augmente de volume sous l'action de la chaleur, puis revient à son volume primitif ou se contracte dès qu'il perd la chaleur qu'il avait reçue. Voilà le phénomène général qui se manifeste à des degrés divers, selon que le corps est gazeux, liquide ou solide ; c'est la propriété qui sert de fondement à la thermométrie et qui a permis, ainsi qu'on vient de le voir, de définir la température, puis de construire des appareils propres à la mesurer. On ne pouvait songer à porter ces appareils au point de précision qu'ils ont atteint, sans savoir suivant quelles lois s'effectuent les variations de volume en question. Il fallait donc avant tout les mesurer pour chaque corps, selon qu'il affecte l'un ou l'autre des trois états, résoudre en un mot le problème suivant : « De combien le volume d'un corps augmente-t-il, de quelle fraction du volume primitif s'accroît-il pour chaque élévation d'un degré centigrade? Cette fraction varie-t-elle d'un corps à un autre, et, pour le même corps, reste-t-elle la même à toute température? Telles sont les questions que se sont naturellement posées les physiciens, après avoir reconnu par l'observation les effets des variations de la chaleur. Avant de donner une idée des résultats auxquels ils sont parvenus, montrons par quelques exemples l'utilité pratique de la connaissance précise de ces effets, et la néces-

sité où l'on est souvent, même hors des laboratoires scientifiques, de les corriger ou de les prévoir. Parlons d'abord de la dilatation des solides.

Si l'on soumet un corps fragile et mauvais conducteur de la chaleur à un brusque changement de température, l'effet produit sera la rupture du corps. Ainsi un morceau de verre froid sur lequel on pose une barre de fer rouge se fend ; il en est de même d'un morceau de verre très chaud au contact duquel on met subitement une barre de fer froide. Dans le premier cas, une dilatation brusque se fait dans les parties du verre touchées par le fer rouge, et les parties voisines, qui n'ont pas eu le temps de s'échauffer encore, s'écartent violemment des premières : d'où la rupture. Dans le second cas, ce sont au contraire les parties touchées qui se contractent, avant que les parties voisines aient eu le temps de se refroidir, et la rupture est encore la conséquence de ce brusque mouvement moléculaire. Tout le monde sait qu'il ne faut pas verser de l'eau bouillante dans un vase froid, sous peine de le voir se briser par l'effet de la dilatation immédiate de la portion des parois que touche le liquide. Le même accident arriverait si l'on posait le vase vide sur des charbons ardents : nous verrons plus loin comment on évite ce résultat, en remplissant le vase du liquide qu'on veut chauffer, avant de le mettre sur le feu.

La dilatation, pendant les saisons chaudes, des métaux qu'on emploie dans les constructions, leur contraction par les froids de l'hiver, donnent lieu à des effets d'autant plus sensibles que ces métaux sont unis à des matériaux dont la dilatabilité diffère plus de la leur. En voici un exemple curieux, cité par Tyndall dans son ouvrage sur la *Chaleur*, et dont l'observation et l'explication sont dues au chanoine Moselly :

« Le toit du chœur de la cathédrale de Bristol est en feuilles de plomb ; sa longueur est de 20 mètres et sa hauteur de 7 mètres. Il avait été posé en 1851, et deux ans après, c'est-à-dire en 1853, il était descendu de près de $1^m,50$. Le plomb avait commencé à descendre presque immédiatement après

la pose. On avait essayé, mais en vain, de l'arrêter dans sa marche par des clous plantés dans les chevrons; la force qui l'entraînait était telle, que les clous furent violemment arrachés. La pente du toit n'est pas très forte; ce n'est donc pas le poids des plombs qui aurait pu les faire glisser. Voici donc simplement la cause qui les a fait descendre : Le plomb est exposé aux variations de température du jour et de la nuit. Pendant le jour, la chaleur le dilate, et, s'il reposait sur une surface horizontale, la dilatation s'effectuerait également dans tous les sens; sur une surface inclinée, elle est plus grande en descendant qu'en montant. Pendant la nuit, au contraire, le plomb se contracte par le refroidissement, mais le retrait de haut en bas du bord supérieur est plus grand que le retrait de bas en haut du bord inférieur. Ses mouvements étaient donc exactement ceux d'un ver de terre : il poussait en avant son bord inférieur pendant le jour; il tirait à lui son bord supérieur pendant la nuit; les variations de température du jour ou de la nuit agissaient dans le même sens. C'est ainsi qu'en rampant lentement il s'était avancé en deux années de $1^{m},50$. »

On voit par cet exemple combien il importe de tenir compte des changements de volume des solides employés dans les constructions ou dans l'industrie. Les rails des voies ferrées s'allongent en été, se raccourcissent en hiver; il faut donc, quand on les pose, laisser un jeu qui permette à l'allongement de se produire librement, sans quoi la chaleur, faisant sauter les chevilles dans les coussinets, déformerait la voie. Le déraillement qui a occasionné la catastrophe de Fampoux, sur le chemin de fer du Nord, en 1844, a eu pour cause, paraît-il, une déformation de ce genre, provenant de ce que les bouts des rails n'avaient pas entre eux un intervalle suffisant.

Les pierres scellées par des crampons de fer sont souvent brisées, tantôt par la dilatation, tantôt par la contraction du métal, l'une et l'autre plus considérables que celles de la pierre. La force avec laquelle les molécules des corps sont tantôt écartées, tantôt rapprochées les unes des autres par le

changement de température est énorme. Une barre de fer longue d'un mètre se dilate de $1^{mm},17$ dans le sens de sa longueur, quand on élève sa température de 0° à 100°; elle se contracterait de la même quantité, en passant de 100° à 0°. Or on calcule que, pour vaincre ce mouvement moléculaire, il faudrait exercer dans un sens ou dans l'autre un effort équivalent à la pression de 2450 kilogrammes, si la barre de fer a un centimètre carré de section, de 245 000 kilogrammes si la section est d'un décimètre carré. On a utilisé cette force pour rapprocher les murs latéraux d'une galerie du Conservatoire des Arts et Métiers, que la poussée de la voûte avait écartés de la verticale[1]. Des barres de fer furent placées de manière à traverser les deux murs à leur partie supérieure ; elles étaient extérieurement terminées en forme de vis munies d'écrous. On les chauffa vivement dans toute leur longueur, ce qui produisit un certain allongement, et on serra les écrous contre d'épaisses pièces de bois appliquées sur la face extérieure des murs de la voûte, pendant que les barres étaient encore chauffées. Le refroidissement contracta les barres, et la force de contraction rapprocha peu à peu les murs. En répétant plusieurs fois la même opération, on finit par les ramener à une position verticale. Les charrons utilisent la force de contraction du fer qui se refroidit, pour garnir de jantes les roues des voitures. Le cercle de fer est forgé de manière à embrasser le contour du bois quand il est chauffé à une assez haute tem-



Fig. 35. — Salle du Conservatoire des Arts et Métiers. Murs redressés par la force de contraction.

1. Cette ingénieuse application de la force de dilatation est due à Molard, qui était, à l'époque où elle a été faite, directeur du Conservatoire des Arts et Métiers.

pérature : en se refroidissant, il se contracte et serre fortement le contour de la roue.

On appelle *larmes bataviques*, ou *gouttes de Rupert*, des gouttes de verre fondu qui ont été subitement solidifiées dans l'eau froide. En brisant le filament de verre qui les termine, toute la masse se trouve instantanément réduite en poussière, avec une telle force que, si l'on a préalablement plongé la larme batavique dans un flacon plein d'eau, le choc transmis par l'eau suffit pour briser le flacon. On obtient un effet analogue avec des flacons de verre très épais, refroidis subitement aussitôt après avoir été soufflés. Un grain de sable projeté dans le vase suffit pour faire voler le fond en éclats (Tyndall). La raison de ce phénomène est la même dans ce dernier exemple que dans les larmes bataviques. C'est l'extérieur des gouttes de verre qui s'est refroidi le premier, emprisonnant la masse intérieure non encore solidifiée. En se refroidissant à son tour, celle-ci se contracte, et l'effort de la contraction s'exerçant partout également sur l'enveloppe extérieure, celle-ci reste en équilibre. Mais toutes les molécules sont dans un état de tension violente, et la moindre rupture, détruisant subitement l'équilibre en un point, le détruit en même temps dans toute la masse.



Fig. 36. — Larme batavique.

On pourrait multiplier les exemples des effets curieux de la dilatation ; ceux que nous venons d'indiquer suffisent pour faire voir, indépendamment de toute préoccupation scientifique, combien il importe de les savoir mesurer ou calculer, afin de les corriger ou de les prévenir. Il faut pour cela connaître ce que l'on nomme le *coefficient de dilatation*. On entend par là l'accroissement que subit l'unité de volume d'un corps, quand on en élève la température de 1° centigrade. Prenons un exemple : Un litre ou 1 décimètre cube de mercure chauffé de 0° à 1° devient un litre plus 179 millionièmes de litre, ou ou $1^{dc},000179$. La fraction 0,000179 est le coefficient de dila-

tation du mercure, pour la température zéro. Les nombres dont il s'agit ici varient avec la nature et l'état physique des substances. De plus, le coefficient de dilatation d'un même corps varie en général aux différents degrés de l'échelle thermométrique, alors même que son état physique ne change pas.

Pour les liquides et les gaz, on ne considère que la dilatation en volume ou cubique; mais on peut, dans les solides, s'occuper seulement de l'accroissement de l'une des dimensions, c'est-à-dire de la *dilatation linéaire*, ou de l'accroissement suivant deux dimensions, c'est-à-dire de la *dilatation superficielle*. Comme un corps solide de forme quelconque se dilate en général également dans tous les sens, de manière à rester semblable à lui-même à toutes les températures, on peut déduire l'accroissement de son volume de celui d'une seule de ses dimensions; d'ailleurs on démontre que le coefficient de dilatation cubique est sensiblement le triple du coefficient de dilatation linéaire[1]. Voilà pourquoi, quand il s'agit de corps solides, c'est le plus souvent ce dernier coefficient qu'on cherche à déterminer.

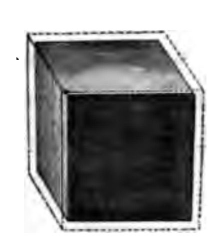


Fig. 37. — Dilatation linéaire et dilatation cubique.

§ 2. MESURE DE LA DILATATION DES CORPS SOLIDES.

Avant l'année 1781, époque à laquelle Laplace et Lavoisier entreprirent, à l'aide d'une méthode que nous allons décrire, la détermination du coefficient de dilatation linéaire de divers corps solides, plusieurs tentatives avaient été déjà faites dans ce même but; mais aucune n'avait donné de résultats d'une

1. Si l'on désigne par λ le coefficient de dilatation linéaire et par K le coefficient de dilatation cubique d'un même corps, il est clair que l'unité de volume, pour une élévation de 1 degré, deviendra soit $1 + K$, soit $(1 + \lambda)^3$ ou $1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3$. Mais λ est une fraction très petite, dont le carré et le cube sont négligeables relativement à la première puissance; on peut donc supprimer les termes $3\lambda^2$ et λ^3, et alors on aura $1 + K = 1 + 3\lambda$, d'où l'on tire: $K = 3\lambda$. Une démonstration semblable fait voir que le coefficient de dilatation superficielle est sensiblement égal au double du coefficient linéaire.

exactitude suffisante[1]. Voici en quels termes ces savants illustres rendent compte des précautions qu'ils avaient prises pour éviter les causes d'erreur des procédés antérieurs, ainsi que des dispositions de leurs expériences :

« Nous avons commencé par faire construire plusieurs thermomètres à mercure très exacts, dans lesquels étaient marqués le terme de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. L'intervalle de chaque degré était d'environ deux lignes (4^{mm},5) et pouvait se subdiviser facilement à l'œil en dix parties. Cependant, comme, malgré l'attention de l'artiste qui avait construit

1. Musschenbroek semble être le premier physicien qui ait fait des expériences de ce genre (1731). L'appareil qu'il imagina dans ce but, et qu'il nomma *pyromètre*, est analogue à celui que nous avons décrit plus haut (fig. 4). Seulement, au lieu d'un simple levier coudé pour recevoir l'action de la barre dilatée, il employait un mécanisme assez compliqué de pignons et de roues dentées, qui transmettaient le mouvement à une aiguille mobile sur un cadran divisé. La barre métallique était chauffée par une série de mèches de lampes à alcool. Outre le défaut provenant de la complication des engrenages, l'appareil employé par Musschenbroek péchait par l'absence de fixité de la barre, disposée sur une cage en fer qui se dilatait elle-même; les dimensions de ses barres (5 pouces 1/2) étaient trop faibles, et enfin l'évaluation de la température était à peu près impossible. Tout ce qu'il put obtenir, c'est de constater et de comparer les dilatations inégales de métaux différents.

Bouguer publia, en 1745, des expériences faites à Quito sur le même sujet; mais son appareil, grossièrement exécuté, était très défectueux, et son thermomètre, gradué sur l'échelle de Réaumur à une altitude de 1460 toises au-dessus du niveau de la mer, donnait des températures trop élevées. Les résultats qu'il obtint étaient fort inexacts.

Smeaton, en 1754, fit en Angleterre des expériences sur la dilatation des métaux. Il opérait sur des barres de 2 pieds 4 pouces qu'il plongeait alternativement dans de la glace pilée et dans l'eau bouillante, en sorte que, comme le remarque Lavoisier, « ses résultats sont indépendants de toute erreur dans la construction du thermomètre ». Mais les points d'appui de ses barres manquaient de fixité : elles reposaient sur des tringles de bois qui se dilataient aussi par la chaleur, et ce qu'il mesurait, ce n'était point la dilatation de la barre, mais seulement l'excès de cette dilatation sur celle de la tringle qui servait de support.

Enfin, de 1756 à 1760, Berthoud employa un pyromètre plus simple que celui de Musschenbroek, mais encore assez compliqué. De plus il plaçait verticalement les barres sur lesquelles il opérait, dans une étuve de 4 à 5 pieds de hauteur. Or la température de l'air d'une telle enceinte était nécessairement variable selon la hauteur où se trouvait plongée la boule du thermomètre. L'incertitude de la graduation de ce dernier instrument, le faible écart des températures se joignant à l'inégalité probable de la température des divers points de la barre métallique ne permettaient point de compter sur des résultats exacts.

Les méthodes que nous décrivons ci-après ont été expérimentées, la première par Laplace et Lavoisier dans le cours des années 1781 et 1782; la seconde, due au général Roy et à Ramsden, en 1785. Dans l'une et dans l'autre, les principales difficultés des procédés antérieurs se sont trouvées heureusement vaincues. Mais il nous a paru instructif, avant de les décrire, de montrer par quels tâtonnements il a fallu passer : c'est un exemple qui se reproduit fréquemment et l'on peut dire presque nécessairement dans les sciences expérimentales.

ces thermomètres, on pouvait craindre encore quelques irrégularités dans leur marche, nous les avons vérifiés tous, en les comparant à un étalon de confiance, et nous avons formé pour chacun une table de correction.

« Au lieu d'employer une étuve, dont il est difficile de maintenir toutes les parties à un même degré de température, nous avons préféré d'employer un bain, que nous remplissions d'abord de glace pilée, et ensuite d'eau, dont nous pouvions élever successivement la température depuis la congélation jusqu'à l'eau bouillante.

« Ce bain pouvait contenir des règles de six pieds de longueur.

« Nous avons opéré dans un jardin (celui de l'Arsenal) et en plein air; les points d'appui de notre pyromètre consistaient en de gros dés de pierre de taille, fondés en maçonnerie à six pieds de profondeur, sur un terrain solide.

« Enfin, nous n'avions ni rouages ni engrenages pour multiplier le mouvement, mais des leviers très solides et absolument inflexibles au degré de résistance qu'ils éprouvaient. Ces leviers faisaient mouvoir une lunette achromatique de six pieds de longueur, mobile sur un axe, et cette lunette était dirigée sur une échelle divisée en pouces et lignes, placée tantôt à 100, tantôt à 200 toises de distance, suivant la nature des expériences.

« Un allongement d'une ligne dans la règle de 6 pieds soumise à l'expérience faisait parcourir à la lunette, lorsque la mire était placée à 100 toises de distance, 62 pouces ou 744 lignes, ce qui donnait la facilité de diviser la ligne en 744 parties. On aurait pu obtenir une précision double en transportant la mire à 200 toises, comme nous l'avions fait dans nos premières expériences; nous n'avons pas tardé à nous apercevoir que les vapeurs souvent répandues dans l'air de l'atmosphère obscurcissaient la vision, et qu'on perdait plus par cette cause d'incertitude qu'on ne gagnait par l'augmentation de la grandeur de l'échelle.

« Tels sont, en général, les principes sur lesquels est fondée la construction du pyromètre dont nous avons fait usage[1]. »

La figure 38 va préciser la description précédente et nous montrer en quoi consiste essentiellement la méthode imaginée par Lavoisier et Laplace pour mesurer la dilatation linéaire d'une barre solide. La barre AB est maintenue fixe en A, de sorte qu'elle ne peut se dilater qu'à l'extrémité B. En se dilatant de la quantité BB′, elle pousse une tige OB, qui peut tourner autour du point O, dans la position OB′. Une lunette LL, qui était d'abord horizontale, tourne elle-même en L′L′, de sorte que, au lieu de viser le point C de la mire verticale CC′, elle vise alors le point C′. Par ce moyen, on substitue donc à la mesure difficile de la très petite quantité BB′ celle d'une longueur CC′, qui vaut autant de fois la première que la distance OC de la mire contient de fois la hauteur de la tige OB.

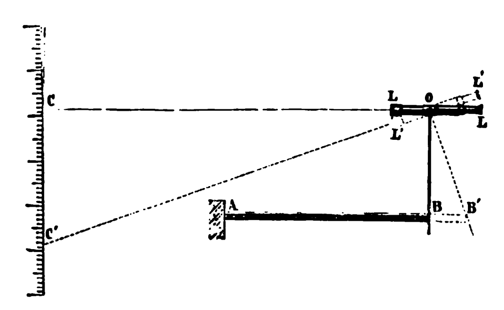


Fig. 38. — Mesure de la dilatation linéaire d'un solide. Principe de la méthode de Lavoisier et Laplace.

La figure 39 montre la disposition de l'appareil qui a servi à réaliser la méthode précédente. On voit la barre métallique S, dont on veut mesurer la dilatation, plongée dans une cuve C remplie d'eau, au-dessous de laquelle est établi le foyer qui doit en élever la température (dans une seconde série d'expériences, l'eau n'était pas chauffée par le fourneau, mais introduite toute bouillante dans la cuve). D'une part, elle s'appuie contre une tige de verre fixe, B′, invariablement liée aux piliers; d'autre part, elle bute contre la règle de verre mobile B qui communique son mouvement à la lunette. L'eau de

1. Extrait du mémoire intitulé : « De l'action du calorique sur les corps solides, *principalement sur le verre et sur les métaux, et du rallongement ou du raccourcissement dont ils sont susceptibles, par cette action, à un degré inférieur à celui qui est nécessaire pour les faire fondre*, par Laplace et Lavoisier. » (Tome II des *Œuvres complètes* de Lavoisier.)

la cuve étant d'abord à 0°, les observateurs notent la division de la mire à laquelle correspond le fil micrométrique horizontalement tendu au foyer de la lunette. Puis, après avoir remplacé l'eau glacée par de l'eau qu'on porte à une température de 100°, celle de l'ébullition, ils observent de nouveau la division de la mire. Par une proportion simple, ils en concluent le rapport de l'allongement de la barre à sa longueur primitive, c'est-à-dire sa dilatation pour 100° de température.

Après un grand nombre d'expériences (chacune étant répétée

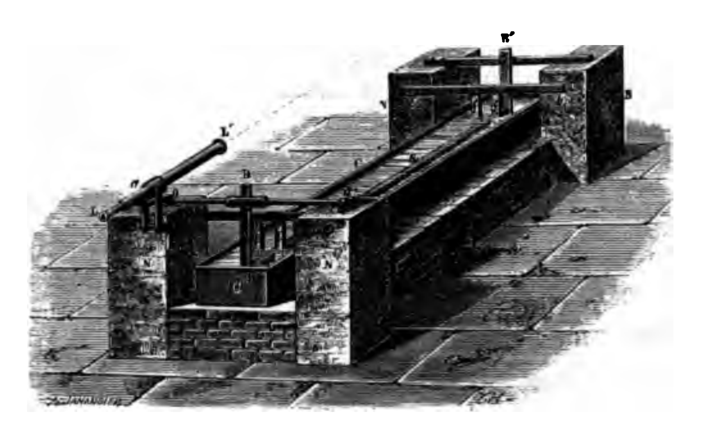


Fig. 39. — Appareil de Laplace et Lavoisier pour la mesure de la dilatation linéaire des solides.

au moins trois ou quatre fois), Lavoisier et Laplace arrivèrent aux conclusions suivantes :

« 1° Un corps qui a été échauffé depuis le terme de la congélation jusqu'à celui de l'eau bouillante, et qui a été refroidi ensuite de l'eau bouillante à la congélation, reprend rigoureusement ses premières dimensions ; 2° le verre et les métaux éprouvent des dilatations sensiblement proportionnelles à celles du mercure, en sorte qu'un nombre de degrés double du thermomètre donne une dilatation double ; un nombre de degrés triple, une dilatation triple, etc. »

L'acier trempé leur présenta des écarts extraordinaires, sa dilatation allant en diminuant d'une manière sensible avec l'augmentation de la température : ce qui tient à ce que l'acier

trempé a une dilatation plus grande que celle de l'acier non trempé. Par la chaleur, l'acier trempé éprouve un commencement de recuit et perd ainsi une partie de sa dilatabilité. Ils reconnurent aussi que le verre se dilate inégalement selon les échantillons expérimentés, c'est-à-dire selon la qualité, le degré de cuisson, la proportion des ingrédients qui entrent dans sa composition. La dilatabilité du fer varie également beaucoup selon les différents états où il se trouve : les fers qu'on trouve dans le commerce ne sont donc pas des métaux identiques. De même l'étain des Indes est plus dilatable que celui de Cornouailles.

A la fin de leur Mémoire, Lavoisier et Laplace constatent l'accord des résultats numériques trouvés par eux avec ceux de Smeaton, et surtout avec ceux de Roy et Ramsden. Ils rendent du reste complètement justice à la méthode adoptée par ces derniers, méthode dont nous allons dire un mot. Venant de décrire l'appareil de Ramsden, ils ajoutent : « Cet instrument paraît, sous tous les rapports, extrêmement propre à remplir l'objet que ces inventeurs avaient en vue; il a dû donner des résultats très exacts, et il est probable que, si nous l'eussions connu avant de nous livrer à ce genre d'expériences, nous n'aurions pas cherché à en imaginer un autre. »

Les expériences du major-général Roy furent faites en 1785, à l'occasion de la mesure de la base de Hown-Stow-Heath, dans la province de Middlesex, en Angleterre. Il s'agissait de connaître avec précision, pour le succès de cette opération géodésique, la dilatabilité des règles métalliques employées à la mesure de la base, aux différents degrés de température auxquels on pouvait opérer. Ce sont d'ailleurs des considérations de même nature qui avaient engagé, quatre ans plus tôt, Lavoisier et Laplace à entreprendre les expériences que nous venons de décrire.

Un constructeur anglais, Ramsden, conçut et exécuta l'appareil dont Roy avait besoin. La figure 40 montre quelle en était la disposition. Trois auges A, B, C sont disposées parallèlement

sur le même support. Celle du milieu est destinée à recevoir la verge métallique *ad*, de 5 pieds anglais de longueur, dont il s'agissait de mesurer la dilatation; cette verge était plongée successivement dans de la glace pilée, puis dans de l'eau qu'on échauffait jusqu'à l'ébullition au moyen de douze lampes à alcool. Les deux autres auges renfermaient chacune, complètement entouré de glace à 0°, un prisme en fonte de même longueur que la règle. Les deux prismes extrêmes, conservant invariablement, pendant toute la durée de l'expérience, la même température, constituaient un système de longueur inva-

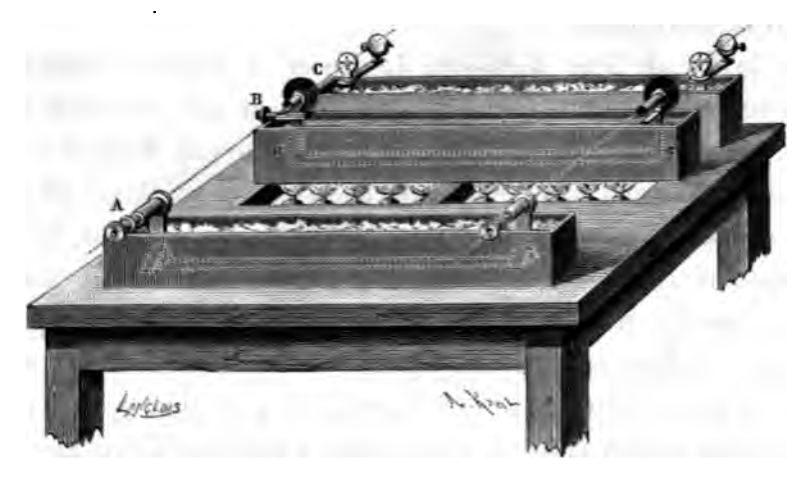


Fig. 40. — Appareil de Ramsden pour la mesure de la dilatation des corps solides.

riable. Chaque prisme portait aux deux extrémités, sur des colonnettes verticales, l'un deux réticules à fils croisés servant de mire et éclairés par de petits miroirs, l'autre deux oculaires aux foyers desquels étaient disposés deux autres réticules de fils croisés; la règle du milieu portait pareillement deux objectifs, constituant avec les oculaires précédents deux lunettes astronomiques.

Voici comment on opère à l'aide de l'appareil Ramsden :

Au début de l'expérience, les deux prismes et la règle étant à la même température de la glace fondante, on dispose les trois systèmes de façon qu'en visant dans chaque oculaire il y ait coïncidence parfaite de l'image des fils réticulaires ser-

vant de mire et des fils placés aux foyers des oculaires. On élève alors la température de l'eau contenue dans l'auge du milieu jusqu'à ce qu'elle atteigne celle de l'eau bouillante. La règle qui s'y trouve plongée se dilate; l'une de ses extrémités qui bute contre une vis extérieure ne s'est point déplacée, ou si elle s'est déplacée, on la ramène à sa position primitive. Toute la dilatation porte donc sur l'autre extrémité; mais la lentille portée par l'autre bout peut se mouvoir à l'aide d'une vis micrométrique permettant d'apprécier les centièmes de millimètre par exemple (dans l'appareil Ramsden la précision des mesures pouvait atteindre $\frac{1}{600}$ de ligne du pied anglais ou $\frac{1}{25}$ de millimètre). Le nombre de tours et de fractions de tour qu'il faut faire effectuer à la vis pour ramener les fils des réticules en coïncidence, mesure donc la quantité dont la règle s'est dilatée entre 0° et 100°, ou entre 0° et toute autre température pour laquelle on voudra faire l'expérience.

Nous donnons dans la figure 41 la vue d'un appareil imaginé par Pouillet pour résoudre les mêmes questions. L'auge qui renferme la règle plongée dans le bain porte à ses deux extrémités deux ouvertures circulaires fermées par des glaces, permettant d'observer, à l'aide de deux lunettes, l'une fixe, l'autre mobile, deux repères tracés aux deux extrémités de la règle. La règle est placée sur deux supports en fer reposant sur les bords de la chaudière; des systèmes de vis permettent de la disposer de telle sorte, que l'un des repères soit toujours en face de l'ouverture qui correspond à la lunette fixe.

Le bain étant porté à la température voulue, la règle se dilate, le second repère se déplace, et à l'aide de la lunette mobile on peut suivre son mouvement à travers la glace transparente. Quant à la mesure de la dilatation, elle s'obtient de la façon suivante. La lunette mobile est portée par une alidade *adb* en laiton et peut tourner avec elle autour d'un axe vertical *ac*. Cette alidade porte des divisions dont la lecture se fait au moyen d'une lunette micrométrique, permettant d'estimer $\frac{1}{50}$ de millimètre. On sait d'ailleurs, par une expérience préa-

table, à quelle fraction de millimètre correspond le mouvement d'une division de l'alidade produit par le déplacement de la lunette mobile. A l'aide de cet appareil, Pouillet a pu mesurer les dilatations pour les températures inférieures à 300° ; mais, en disposant autrement les règles, dans un fourneau où l'on pouvait faire passer soit de l'air chaud, soit même de la flamme, il pouvait mesurer les dilatations pour les températures plus élevées.

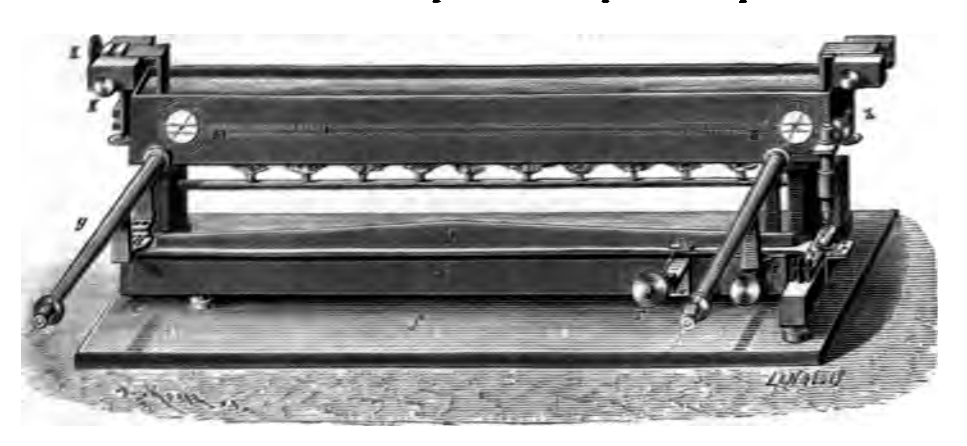


Fig. 41. — Appareil Pouillet pour la mesure des dilatations.

Arrivons maintenant aux résultats obtenus, et terminons ce paragraphe par une table donnant les coefficients de dilatation linéaire d'un certain nombre de corps solides pour l'intervalle de 0° à 100°. Chaque nombre de ce tableau exprime des dix-millionièmes d'unité, de sorte qu'il doit être précédé des chiffres 0,0000. Par exemple le coefficient de dilatation du bismuth doit s'écrire ainsi : 0,0000139.

La dilatation totale d'une barre solide, de longueur L à 0°, pour un nombre de degrés t, s'obtient en multipliant cette longueur par le coefficient du corps et par t ; en ajoutant le produit à L, on aura la longueur de la barre dilatée ; c'est ce qu'exprime la formule suivante, dans laquelle α est le coefficient moyen donné par le tableau qui suit, pour la substance dont la barre est formée : $L' = L(1 + \alpha t)$.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES POUR 1 DEGRÉ DANS L'INTERVALLE DE 0° A 100°.

1° *Métaux et alliages.*

Zinc . . . . de	294 à	341
Cadmium.	»	313
Plomb.	278	288
Étain	194	228
Aluminium.	»	222
Cuivre jaune.	178	214
Argent.	191	208
Bronze	182	191
Cuivre rouge.	170	172
Or.	147	155
Fer.	116	144
Bismuth.	»	139
Acier recuit.	124	137
Acier trempé.	122	137
Acier	107	119
Fonte de fer.	098	112
Platine.	086	088

2° *Solides divers.*

Glace (de — 27°,5 à — 1°).	513	528
Gypse (longueur du prisme).	»	140
Marbre blanc	085	107
Verre blanc	077	092
Pierre à bâtir.	043	090
Flint	082	087
Granit.	079	090
Marbre.	042	057
Briques	049	055
Bois de sapin	035	050

Nous n'avons pas besoin de faire remarquer que les chiffres extrêmes donnés ici pour chaque coefficient dépendent, non pas seulement des expérimentateurs qui les ont obtenus, selon le degré de perfection des méthodes employées, mais de la nature physique des échantillons, de leur degré plus ou moins grand de pureté, de la différence de composition des alliages ou des substances telles que le verre.

Il est à remarquer que les métaux les plus dilatables sont aussi les plus fusibles. C'est ce qu'avait constaté Berthollet,

qui croyait pouvoir en conclure que le coefficient de dilatation d'un métal doit aller en augmentant à mesure qu'on se rapproche de la température de fusion. Cette prévision s'est trouvée vérifiée par les mesures directes. Par exemple, si l'on cherche le coefficient moyen de dilatation d'un solide, non plus de 0° à 100°, ainsi que le donne la table précédente, mais de 0° à 200°, à 300°, on obtient des nombres notablement plus forts. En voici quelques-uns :

Entre 0° et 100°, le coefficient du platine varie de 0,0000086 à 0,0000088 ; entre 0° et 300°, il s'élève à 0,0000092. Dulong et Petit ont trouvé 0,0000086 pour une règle de verre blanc entre 0° et 100°; pour 200°, le coefficient du même verre s'élève à 0,0000092; pour 300°, à 0,0000101. Le cuivre rouge a pour coefficient moyen de 0° à 300° le nombre 0,0000188; le fer, 0,0000147.

§ 3. DILATATION DES CRISTAUX.

Nous avons supposé, dans tout ce qui précède, que la dilatation se faisait également dans tous les sens, et dès lors, qu'un corps conservait, en s'échauffant ou en se refroidissant, à une température quelconque, la forme qu'il affectait à une autre température. Cela est exact pour les solides homogènes et amorphes, mais ne l'est plus si l'on a affaire à des solides cristallisés, à ceux du moins dont les propriétés physiques varient selon l'orientation.

En 1823, Mitscherlich fit l'observation suivante. Ayant mesuré les inclinaisons mutuelles des faces d'un rhomboïde de carbonate de chaux (spath d'Islande) à des températures différentes, ce savant reconnut que ces inclinaisons variaient d'une manière sensible : de 0° à 100° cette variation s'élevait à 8′30″. Les angles dièdres diminuaient quand la température augmentait. Il résultait de là que la dilatation était plus grande dans la direction du petit axe du rhomboïde que dans celle des

autres diagonales, en un mot, que la forme du cristal se rapprochait de celle du cube. Une conséquence de ce fait, c'est que la double réfraction du spath d'Islande devait également diminuer avec la température ; or des expériences de Fresnel confirmèrent cette prévision de Mitscherlich. Le coefficient de dilatation de la chaux carbonatée dans le sens du petit axe est, en outre, assez grand pour que, même dans l'hypothèse où elle

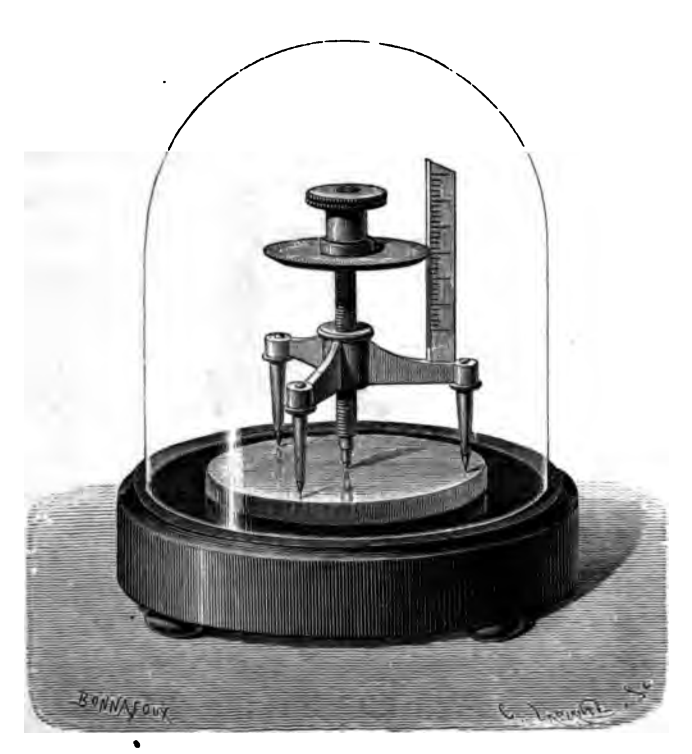


Fig. 42. — Mesure de l'épaisseur d'une plaque à l'aide du sphéromètre[1].

serait nulle perpendiculairement à l'axe, la dilatation totale ou cubique de cette substance dût dépasser celle du verre. Or la mesure directe de la dilatation cubique du spath d'Islande montre qu'elle lui est au contraire inférieure. De là une conséquence singulière : c'est que, si la chaleur dilate le cristal parallèlement à son axe, elle doit le contracter ou rapprocher ses molécules dans des directions perpendiculaires. Pour s'assurer

1. L'instrument connu sous le nom de *sphéromètre*, et que représentent les figures 42 et 43, a pour objet la mesure de très petites épaisseurs, par exemple celle des lames minces

de ce fait, Mitscherlich fit tailler des plaques de spath d'Islande parallèlement à l'axe; puis il mesura leur épaisseur à l'aide

à faces parallèles. Ce n'est autre chose qu'une vis micrométrique montée sur un trépied à pointes d'acier parfaitement trempées. La vis, dont le pas, très régulier, a par exemple $0^{mm},5$, s'engage au milieu du trépied dans une ouverture façonnée en écrou; elle est surmontée d'un bouton fileté qui sert à la faire mouvoir, et porte un cercle horizontal divisé en 500 parties égales. Une règle verticale divisée en demi-millimètres, vissée sur l'un des pieds, sert d'index aux mouvements d'ascension de la vis et marque le nombre de tours qu'elle fait. Le trépied repose sur un plan de verre fixe et douci à l'émeri; quand on amène la pointe de la vis au niveau de ce plan et le touchant, le cercle divisé se trouve précisément au niveau du zéro de la règle.

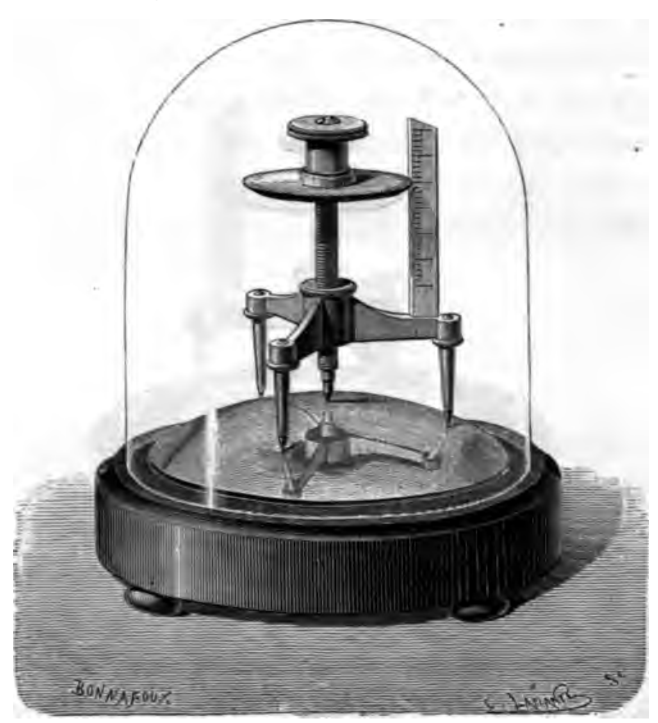


Fig. 43. — Sphéromètre; évaluation des courbures.

Pour mesurer l'épaisseur d'une lame mince, on la place sous la vis, et l'on est obligé de remonter celle-ci en tournant le bouton fileté jusqu'à ce qu'il y ait contact simultané des trois pointes du trépied sur le plan de verre. Le nombre des divisions de la règle-index donne le nombre des tours ou des demi-millimètres d'épaisseur; celui des divisions du cercle horizontal marque en plus la fraction de tour. Supposons que l'on ait monté la vis à la troisième division et que la division du cercle horizontal située en regard de l'index soit 40; l'épaisseur de la lame sera $3 \times 0^{mm},5 + \frac{40}{500} \times 0^{mm},5 = 1^{mm},54$.

L'emploi du sphéromètre exige une certaine habitude pour reconnaître le moment précis où les trois pointes du trépied et celle de la vis touchent à la fois le plan fixe et la lame dont il s'agit de mesurer l'épaisseur. Son nom lui vient de ce qu'il a été inventé dans le but d'évaluer la courbure des lentilles sphériques. La figure 43 montre l'appareil fonctionnant en vue de cette dernière opération.

d'un *sphéromètre* à des températures différentes, et constata l'exactitude de ses prévisions.

Voilà donc une substance cristallisée qui subit dans un sens une dilatation, dans un autre sens une contraction, sous l'influence d'un accroissement de chaleur. Le spath d'Islande a ainsi deux coefficients, l'un de dilatation, qui a pour valeur 0,00002621, l'autre de contraction ou de dilatation *négative*, qui a pour valeur — 0,00000540.

L'étude des dilatations des cristaux a été poursuivie, depuis les premières recherches de Mitscherlich et de Fresnel, notamment par notre savant compatriote M. Fizeau, et elle a conduit à quelques lois simples que nous allons résumer.

On sait que les corps cristallisés, naturels ou artificiels, se divisent, selon leur forme géométrique, en divers systèmes, dont nous n'avons point ici à définir les caractères. Au point de vue de la dilatation, ils forment trois classes. A la première se rattachent les cristaux cubiques ou dont la forme polyédrique dérive du cube ; leur dilatation se fait également dans tous les sens, de sorte que, quelle que soit la température, leur forme reste la même. Le sel gemme, l'alun, le spath fluor sont des exemples de ce premier système. La seconde classe renferme des cristaux caractérisés par un axe principal et par deux ou trois axes secondaires situés dans un plan perpendiculaire au premier. Ces cristaux ont deux coefficients de dilatation linéaire de valeur inégale, correspondant, l'un à la direction de l'axe principal, l'autre à la direction normale. Le zircon, le quartz, la chaux carbonatée ou spath d'Islande, la tourmaline, l'émeraude, appartiennent à cette seconde classe. Enfin la troisième classe comprend les cristaux possédant trois axes inégaux, différents par leurs propriétés ; tels sont la topaze, le sulfate de magnésie, le feldspath, le gypse ou sulfate de chaux. Ces cristaux ont trois coefficients inégaux de dilatation, soit suivant la direction de leurs axes, soit suivant d'autres directions[1].

1. Le coefficient de dilatation cubique K de chacune de ces classes s'obtient en triplant a valeur du coefficient linéaire unique pour la première, en faisant la somme algébrique $\alpha + 2\alpha'$ pour la seconde, et $\alpha + \alpha' + \alpha''$ pour la troisième.

On peut constater, par une expérience facile, l'existence de cette inégalité de la dilatation dans les cristaux, à l'aide d'un fragment de gypse, pris dans la variété connue sous le nom de *gypse en fer de lance*, qu'on trouve notamment dans les carrières des environs de Paris. On taille dans un de ces fragments une lame terminée par deux faces planes et polies perpendiculairement à la ligne médiane qui divise le cristal. Puis on porte la lame à une température de 80° par exemple. On aperçoit alors aisément la déformation que l'inégalité de dilatation a produite dans les deux faces, qui ont cessé d'être planes. En cherchant à voir par réflexion un objet délié, un fil, dans l'une d'elles comme dans un miroir, on aperçoit deux images

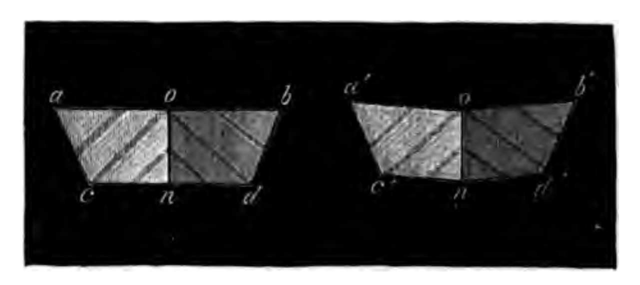


Fig. 44. — Effets de l'inégale dilatation du gypse fer de lance.

du fil, ce qui n'arriverait point si la face était restée plane comme elle était avant qu'on en élevât la température.

Les déterminations des coefficients de dilatation d'un grand nombre de cristaux ont été effectuées par M. Fizeau, à l'aide d'une méthode optique spéciale, qui consiste à obtenir les anneaux colorés de Newton par la superposition d'un plan de verre et d'une lame mince du cristal, puis à observer le déplacement des franges qui se produit quand on élève la température. En étudiant sous ce rapport les substances composées cristallines qui appartiennent au groupe des chlorures, bromures et iodures métalliques, M. Fizeau n'a pas seulement reconnu leur grande dilatabilité qui surpasse celle des métaux les plus dilatables, il a pu mettre en évidence une anomalie singulière, présentée par l'une de ces substances, l'iodure

d'argent. Ce composé, qui a joué, ainsi que nous l'avons vu dans notre second volume, un si grand rôle dans l'invention de la photographie, est formé, sur 100 parties, de 54,02 d'iode et de 45,98 d'argent. Voici en quels termes le savant physicien annonçait le fait dont nous voulons parler :

« Non seulement l'iodure d'argent, dit-il, ne possède pas la grande dilatabilité de ses congénères, mais encore il présente avec eux, sous ce rapport, un contraste aussi complet qu'inattendu. Il paraît résulter en effet, de la manière la plus certaine, des épreuves variées auxquelles ce corps a été soumis, que l'iodure d'argent possède la propriété de se contracter ou de diminuer de volume lorsque la température s'élève, et de se dilater, au contraire, ou d'augmenter de volume lorsque la température s'abaisse, le phénomène restant toujours parfaitement régulier et continu entre les limites de température de —10° et +70°. Il convient de faire remarquer que l'iodure d'argent n'est fusible qu'à une température élevée (vers 400°), en sorte que les effets en question ne peuvent être attribués aux irrégularités qui pourraient se produire dans le voisinage de la température correspondant au changement d'état de la substance. Les effets sont d'ailleurs bien constants et exactement inverses l'un de l'autre pendant l'échauffement et le refroidissement.

« La dilatation de l'iodure d'argent doit donc être exprimée par un coefficient négatif, au moins pour tout l'intervalle de température compris entre —10° et +70°. De plus, à mesure que la température s'élève entre ces limites, la valeur numérique du coefficient augmente notablement, en sorte que la contraction s'accroît de plus en plus[1]. »

M. Fizeau a opéré successivement sur l'iodure d'argent fondu, et sur la même substance en poudre comprimée. Dans ces deux cas, la contraction avait lieu dans toutes les directions, et le coefficient négatif a été trouvé égal à —0,000000139 et

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1867, t. I.

— 0,000000137. L'iodure d'argent cristallisé se contracte dans la direction de l'axe principal et se dilate normalement à cette direction; mais le premier coefficient est — 0,00000397 et le second + 0,00000065, en sorte qu'il y a diminution de volume en définitive.

L'action de la chaleur augmentant le volume des corps diminue par là même leur densité. On pourrait donc, en déterminant la densité à des températures différentes, par les procédés que nous avons décrits, conclure des résultats obtenus la valeur du coefficient de dilatation cubique. C'est ainsi, en effet, qu'on s'est assuré d'un fait sur lequel on avait jadis des doutes : nous voulons parler de la contraction de la glace par le froid; on avait même cru reconnaître que la glace se dilate à mesure que sa température s'abaisse. Mais des mesures de la densité de cette substance obtenues par Brunner en évaluant la perte de poids dans l'huile de pétrole d'un même morceau de glace bien exempt de bulles d'air, à 0° et à — 6°, ont fourni pour le coefficient de dilatation linéaire un nombre plus grand que pour les autres solides connus, ainsi qu'on a pu le voir déjà en ce qui concerne les corps inscrits dans notre tableau de la page 105. Depuis, Geissler et Plücker ont trouvé jusqu'à 0,0000528, nombre qui dépasse des deux tiers le coefficient du zinc, le plus dilatable des métaux.

CHAPITRE IV

DILATATION DES LIQUIDES

§ 1. DÉTERMINATION DE LA DILATATION ABSOLUE DU MERCURE.

En comparant entre eux les résultats consignés dans les divers paragraphes du chapitre qui précède, on voit aisément que les corps solides, amorphes ou cristallisés, sont loin de suivre la même loi dans leurs dilatations. Non seulement leurs variations de volume pour un même changement de température diffèrent considérablement d'un corps à l'autre, mais encore elles diffèrent, pour un même corps, quand on considère des variations égales de la température en des points divers de l'échelle thermométrique. Quelle est la véritable signification de ces résultats?

Pour nous en rendre compte, il ne faut pas oublier que la mesure des températures, telle qu'elle résulte de la construction et de la graduation du thermomètre à mercure, est nécessairement arbitraire, ou conventionnelle. Un degré centigrade indique soit une dilatation si la température s'élève, soit une contraction si elle s'abaisse, égale à la 6480e partie du volume du mercure à la glace fondante ; dans l'un et l'autre cas d'ailleurs intervient la dilatation ou la contraction du verre. Dire que le coefficient de dilatation d'un corps s'élève, par exemple, avec la température, c'est donc tout simplement reconnaître que la loi de dilatation de ce corps n'est pas, pour des accroissements égaux de température, la même que la loi de dilatation

du mercure. Mais cela ne préjuge rien sur la loi, inconnue jusqu'ici, qui peut lier les indications du thermomètre, ou les variations de volume des solides mesurés, avec les réelles quantités de chaleur qui produisent ces différents effets.

Nous savons aussi déjà que nous trouverons des divergences pareilles dans les liquides, car nous avons vu que des thermomètres construits et gradués sur le principe du thermomètre à mercure, mais remplis avec des liquides différents, ne s'accordent point quand on les soumet à des températures autres que celles des points fixes communs. Les liquides, comme les solides, n'ont donc pas les mêmes coefficients de dilatation, et leurs dilatations suivent d'autres lois que la dilatation du mercure.

Il est d'autant plus important de s'assurer de ces différences et de les constater par des mesures précises que, quand nous avons parlé de la dilatation du mercure ou de celle des autres liquides, ce n'est pas leur *dilatation réelle* ou *absolue* que nous avons eue en vue jusqu'ici, mais seulement leur *dilatation apparente*, puisqu'il n'a pas été tenu compte des variations de volume que subit l'enveloppe qui les renferme. Le nombre qu'on a trouvé et que nous venons de rapporter, $\frac{1}{6480}$, exprime la dilatation apparente du mercure, c'est-à-dire sa dilatation absolue diminuée de celle du verre.

Un grand nombre de physiciens, parmi lesquels nous citerons Dalton, Cavendish, Deluc, Lavoisier et Laplace, ont mesuré cette dilatation absolue du mercure par des procédés divers, mais sans dépasser la température de 100°. Tantôt ils ajoutaient la dilatation du verre à la dilatation apparente, tantôt ils mesuraient directement la dilatation absolue en mesurant la hauteur du mercure dans le baromètre sous une même pression, mais à des températures différentes. Dulong et Petit ont résolu cette question par une méthode que nous allons décrire sommairement et qui s'appuie sur un principe fort simple, que Boyle avait déjà énoncé en ces termes :

Quand deux colonnes verticales d'un même liquide à deux températures différentes se font équilibre, leurs hauteurs sont en raison inverse de leurs densités. Mais comme ces densités varient elles-mêmes en raison inverse des volumes, il s'ensuit que les variations de volume pourront se mesurer par les variations de hauteur.

Considérons deux tubes verticaux A, B, communiquant par un tube horizontal CD et contenant du mercure. Si les deux tubes et le liquide qu'ils contiennent sont à la même température, à 0° par exemple, leurs niveaux supérieurs seront à la même hauteur verticale (fig. 45, 1). Supposons maintenant que,

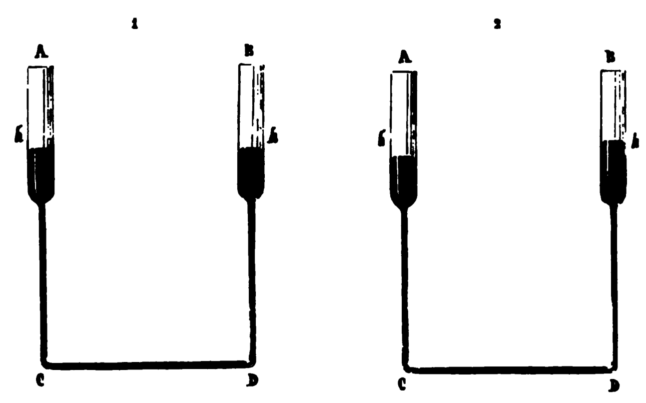


Fig. 45. — Principe de la méthode de détermination de la dilatation absolue d'un liquide.

le tube A restant à 0°, on élève la température du tube B, et admettons que le tube horizontal CD ait un diamètre assez petit pour s'opposer au mélange des masses liquides inégalement chauffées. Dans ces conditions, le niveau du mercure s'élèvera dans B au-dessus du niveau du mercure dans A (fig. 45, 2), et en appelant h et h' les hauteurs des deux colonnes verticales au-dessus de l'axe du tube horizontal, d et d' les densités du mercure, on aura d'après le principe énoncé plus haut $\frac{d}{d'} = \frac{h'}{h}$. Si dans le tube B le volume du mercure à 0° était V, il est devenu V′ à la température nouvelle à laquelle le liquide a été porté, et l'on a aussi $\frac{d}{d'} = \frac{V'}{V}$. D'où la conséquence $\frac{V'}{V} = \frac{h'}{h}$ et

par suite $\frac{V'-V}{V}=\frac{h'-h}{h}$. Or le premier terme $\frac{V'-V}{V}$ exprime le rapport entre l'augmentation de volume ou la dilatation absolue du mercure et ce volume à 0°. C'est la dilatation de l'unité de volume du mercure pour le nombre de degrés compris entre 0° et la température à laquelle le tube B a été porté. Soit t° cette température; en divisant par t, on trouvera le *coefficient de dilatation absolue du mercure* pour 1° entre 0° et t°.

Ainsi, la méthode imaginée par Dulong et Petit consiste à substituer à la mesure des volumes la mesure des hauteurs de deux colonnes verticales de mercure inégalement chauffées. Elle n'exige, pour être aussi précise que possible, que deux conditions essentielles : la première consiste à mesurer rigoureusement la hauteur verticale d'une colonne de mercure, ainsi que la différence de cette hauteur avec une colonne verticale voisine. La seconde condition est de déterminer avec exactitude la température du mercure de la colonne échauffée, l'autre restant à la glace fondante.

La figure 46 va nous faire voir comment Dulong et Petit avaient disposé leurs expériences, de manière à réaliser autant que possible ces deux conditions. Le tube horizontal qui mettait en communication les deux branches verticales contenant le mercure était fixé à une forte barre de fer reposant par trois pieds sur une table en bois munie de vis calantes. Des niveaux à bulle d'air servaient à obtenir la parfaite horizontalité du tube. L'une des branches verticales B était entourée d'un manchon rempli de glace pilée, et le montant qui la soutenait était terminé en haut par une pointe *i* servant de repère. La seconde branche A était entourée d'un manchon en cuivre rempli entièrement d'une huile fixe, dont la température pouvait être élevée jusqu'à 300°. A cet effet, un fourneau (dont la moitié antérieure est enlevée dans la figure 46) enveloppait de toutes parts le manchon et servait à élever sa température. Dès qu'on voulait observer, on fermait toutes les ouvertures du fourneau et la température du bain d'huile devenait bientôt stationnaire.

Alors, à l'aide d'un cathétomètre, on déterminait la hauteur du point de repère *i*, celle du niveau du mercure dans le tube B (observé à travers une échancrure du manchon), et celle du niveau du mercure dans la branche A qui dépassait d'un demi-millimètre environ le dessus du couvercle du manchon. On obtenait ainsi la différence des hauteurs $h'-h$. La température du manchon de glace pilée étant à 0°, on n'avait plus qu'à connaître celle du bain d'huile, que donnaient à la

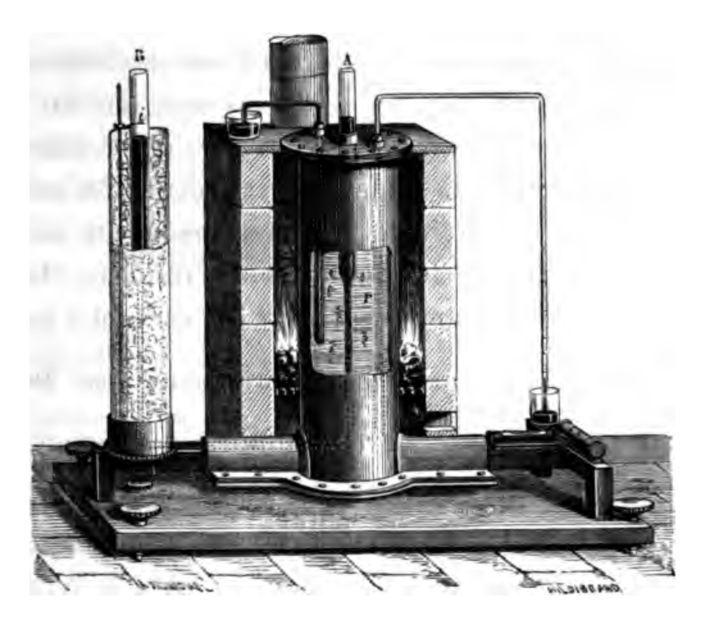


Fig. 46. — Appareil de Dulong et Petit pour la détermination de la dilatation absolue du mercure.

fois un thermomètre à mercure, un thermomètre à poids et un thermomètre à air. La moyenne de leurs indications convenablement corrigées donnait la température.

Des observations répétées ont donné à Dulong et Petit le coefficient de dilatation absolue du mercure, qu'ils ont trouvé constant et égal à $\frac{1}{5550}$ pour chaque degré du thermomètre compris entre 0° et 100°. Ils ont également reconnu que ce coefficient augmentait d'une manière sensible avec la température à mesure qu'elle s'élevait au-dessus de 100°.

Les expériences de ces savants physiciens ont été reprises depuis par Victor Regnault, qui, tout en s'appuyant sur le même principe, a construit un appareil permettant d'éviter diverses causes d'erreur. Les colonnes de mercure n'ayant que 50 à 60 centimètres dans l'appareil de Dulong et Petit, les différences de niveau étaient trop faibles; dans l'appareil Regnault, leur longueur est triplée. La température de l'huile du manchon, chauffée par le bas et non agitée, n'était pas uniforme; dans les nouvelles expériences, un agitateur obviait à cet inconvénient. Les expériences de Regnault ont confirmé les résultats généraux trouvés par ses prédécesseurs, tout en fournissant des valeurs numériques plus précises des coefficients de dilatation du mercure. Le tableau suivant donne les coefficients *moyens* entre 0° et diverses températures et les coefficients *vrais* pour ces mêmes températures déterminées. On remarquera que le coefficient moyen de 0° à 50° est égal à la fraction $\frac{1}{5547}$, qui est à peu près le nombre donné par Dulong et Petit de 0° à 100°. Aussi, entre les limites en question, on continue à se servir de la valeur $\frac{1}{5550}$, que la mémoire retient aisément.

DILATATION ABSOLUE DU MERCURE.

Coefficient moyen pour les températures.		Coefficient vrai.	
de 0° à 50°. . . .	0,00018027	à 0°. . . .	0,00017901
de 0° à 100°. . . .	0,00018153	à 50°. . . .	0,00018152
de 0° à 150°. . . .	0,00018279	à 100°. . . .	0,00018305
de 0° à 200°. . . .	0,00018405	à 150°. . . .	0,00018657
de 0° à 250°. . . .	0,00018531	à 200°. . . .	0,00018909
de 0° à 300°. . . .	0,00018658	à 250°. . . .	0,00019161
de 0° à 350°. . . .	0,00018784	à 300°. . . .	0,00019413
		à 350°. . . .	0,00019666

La connaissance de la dilatation absolue du mercure a permis à Dulong et Petit de trouver la dilatation cubique de divers métaux, tels que le fer, le platine, le cuivre. Pour ce dernier métal, que le mercure attaque, il fallait en oxyder préalable-

ment la surface. Ils se servaient pour cela d'un tube de verre à pointe effilée et recourbée, de même forme que celui qui sert pour le thermomètre à poids.

Avant de souder la tige du tube, on y introduit un cylindre du métal à étudier, présentant des saillies de façon à ne toucher les parois que par quelques points. On emplit l'appareil de mercure qu'on dessèche par l'ébullition ; puis on le laisse refroidir à 0°, la pointe plongeant dans du mercure sec. On le pèse alors et, en retranchant du poids obtenu celui du métal et du tube, on a le poids du mercure introduit. On connaît les densités du métal et du mercure à 0°, on en déduit leurs volumes, dont la somme est évidemment égale à la capacité intérieure de l'appareil à cette même température de 0°.

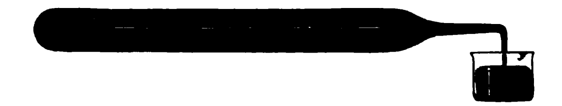


Fig. 47. — Dilatation cubique des solides par le thermomètre à poids.

Supposons qu'on élève maintenant le tout à une température T, en plongeant l'appareil dans un bain d'huile à cette température, puis qu'on recueille et qu'on pèse le mercure qui sort par la pointe. Il est clair que le volume de mercure sorti est égal à l'augmentation de volume du mercure et du métal diminuée de celle de l'enveloppe. On écrit cette égalité ou cette équation[1], dans laquelle il n'y a qu'une inconnue, le coefficient de dilatation cubique du métal, et dont la résolution n'offre d'ailleurs aucune difficulté.

Nous avons vu que le coefficient de dilatation apparente du mercure est égal à $\frac{1}{6480}$; celui de la dilatation absolue à $\frac{1}{5550}$.

1. Voici l'équation relative à cette expérience :

$$\left(\frac{p}{d}+\frac{P}{D}\right)(1+KT)=\frac{P-p'}{D}(1+MT)+\frac{p}{d}(1+Tx),$$

dans laquelle p, P, p' représentent les poids du cylindre de métal, du mercure introduit et du mercure sorti, d et D les densités à 0° du métal et du mercure, et enfin K, M et x les coefficients de dilatation du verre, du mercure et du métal. T est la température à laquelle on a porté le bain d'huile.

La différence $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$ donnera la dilatation de l'enveloppe ou du verre pour les mêmes limites de température 0° et 100°. Le calcul donne $\frac{1}{38700}$, ou en décimales 0,0000258. C'est la dilatation cubique du verre blanc à base de soude.

§ 2. DILATATION CUBIQUE DES LIQUIDES QUELCONQUES.

On vient de voir comment, la dilatation absolue du mercure étant connue, on a pu en déduire celle du verre, en s'appuyant sur cette relation fort simple, que la dilatation apparente d'un liquide est sensiblement égale à sa dilatation absolue diminuée de celle de l'enveloppe qui le contient. La même relation va maintenant permettre de mesurer la dilatation absolue des liquides sans qu'on soit obligé de recommencer les expériences délicates qui ont servi pour le mercure.

On se sert, dans ce but, d'une enveloppe thermométrique graduée en divisions d'égale capacité, ainsi qu'on le fait pour construire un thermomètre étalon, et dont le volume du réservoir est exactement mesuré en prenant pour unité l'une de ces parties. On y introduit le liquide à étudier; on plonge l'appareil dans un manchon qui renferme de la glace fondante; on note la division à laquelle s'élève le niveau, et l'on a de la sorte le volume du liquide à 0 degré. Cela fait, on le porte dans un bain à une température connue, et l'on note également la division du tube à laquelle parvient le liquide, d'où l'on conclut le volume à cette température nouvelle. La différence des volumes rapportée au volume à zéro donne la dilatation apparente du liquide dans le verre de l'enveloppe. Si donc la dilatation du verre employé a été préalablement déterminée, une simple addition donnera la dilatation réelle pour l'intervalle des températures observées.

Deluc a fait le premier des expériences exactes sur ce

sujet, mais sans tenir compte, à la vérité, de la dilatation des enveloppes, qu'il croyait négligeable en comparaison de celle des liquides; et il reconnut que, si l'on calcule la dilatation pour 1 degré, elle n'est point constante : elle va en croissant à mesure que la température s'élève. Gay-Lussac, Thomson, Dalton, puis, en dernier lieu, M. Isidore Pierre ont étudié la dilatation des liquides par diverses méthodes. La méthode qui a servi à M. Pierre pour mesurer la dilatation d'un grand nombre de liquides différents est celle que nous venons de résumer plus haut, et la figure 48 représente l'appareil qu'il a disposé pour ces recherches. Le tube thermométrique contenant le liquide plonge dans un bain d'eau ou d'huile contenu dans un réservoir cylindrique posé sur un fourneau. A côté se trouve un thermomètre à mercure qui donne la température du bain. Les parties extérieures des tiges sont elles-mêmes renfermées dans un manchon plein d'eau, et un second thermomètre donne la température de cette eau, afin qu'on puisse faire les corrections nécessaires provenant de ce que les enveloppes thermométriques ne sont pas en tous leurs points soumises à la température du bain. Des agitateurs permettaient de répartir uniformément la chaleur dans toutes les parties des réservoirs. Une précaution importante à prendre avant de commencer les observations, c'est de bien purger d'air le liquide à étudier : ce à quoi on arrive par l'ébullition,



Fig. 48. — Appareil de M. Is. Pierre pour la mesure de la dilatation des liquides.

ou, si le liquide est trop volatil, par le jeu de la machine pneumatique.

Le coefficient de dilatation varie, pour un même liquide, avec la température; il va en croissant suivant une loi que l'expérience seule permet de formuler, et qui diffère beaucoup d'un liquide à l'autre. Thomson a remarqué qu'en général les liquides les plus dilatables sont ceux dont la température d'ébullition est la moins élevée. Toutefois ce n'est pas une loi absolue. Voici d'après M. Is. Pierre la dilatation de quelques liquides à 0°, et au point d'ébullition de chacun d'eux[1] :

SUBSTANCES	COEFFICIENT DE DILATATION		
	À 0°	AU POINT D'ÉBULLITION	TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION
Alcool	0,0010486	0,0011955	78°,3
Éther sulfurique.	0,0015132	0,0016474	35°,5
Sulfure de carbone. . . .	0,0011398	0,0012493	47°,9
Liqueur des Hollandais. .	0,0011189	0,0012824	84°,9
Brome	0,0010382	0,0011677	63°,0
Alcool méthylique	0,0011856	0,0013297	63°,0
Chlorure de silicium . . .	0,0012941	0,0015635	59°,0
Chloroforme	0,0011071	0,0013205	63°,5
Essence de thérébentine. .	0,0008474	0,0280800	150°,0

En comparant la dilatabilité des divers liquides à leur compressibilité, on a cru reconnaître que les liquides qui se compriment le plus facilement sont aussi ceux dont le coefficient de dilatation est le plus grand. Le nombre des liquides dont la compressibilité a été mesurée est petit. En rangeant

1. C'est-à-dire entre 0° et le point extrême où le liquide peut être amené sans changer d'état. L'augmentation de volume des liquides n'étant pas proportionnelle à l'accroissement de température, on a cherché à l'exprimer par ce qu'on nomme une formule *empirique*, composée d'une fonction des puissances successives (carré, cube...) de la température. On met cette fonction sous la forme $at + bt^2 + ct^3 + \ldots$, où t représente la température à partir de 0 (positive ou négative selon qu'elle est comptée au-dessus ou au-dessous). Les coefficients a, b, c sont des nombres dont la valeur s'obtient en cherchant la dilatation du liquide pour trois températures différentes au moins; de la sorte on peut trouver approximativement les dilatations pour des températures intermédiaires. Voici un exemple d'une de ces expressions empiriques; c'est la formule trouvée pour l'alcool du tableau ci-dessus :

$$\Delta = 0{,}0010486\,t + 0{,}0000017510\,t^2 + 0{,}000000001345\,t^3.$$

par ordre de dilatabilité (moyenne entre 0° et 100°) quelques-uns d'entre eux, on a la série suivante : *éther*, *alcool*, *essence de térébenthine*, *chloroforme*, *eau*, *mercure*, série qui ne diffère de la série où ils sont rangés par ordre de compressibilité que par la place du chloroforme, qui du quatrième rang passe au second. Une semblable relation se remarque pour les solides, dont les plus compressibles sont aussi généralement les plus dilatables.

On peut se rendre compte d'ailleurs de la force prodigieuse que la chaleur exerce sur les molécules des corps pour les écarter, par la grandeur des efforts qu'il faudrait exercer pour ramener un corps dilaté au volume qu'il occupait avant que la chaleur ne modifiât ce volume. Par exemple, l'élévation de température du mercure de 0° à 30° produit une dilatation totale de 0,0053928. Or la compressibilité de ce liquide est égale à 0,00000295, c'est-à-dire que la pression d'une atmosphère diminue son volume de 295 cent-millionièmes. Il faudrait donc, pour ramener ce volume à 0°, ou encore pour s'opposer à la dilatation produite par l'élévation de température de 0° à 30°, exercer sur le liquide l'énorme pression de 1828 atmosphères. La contraction due à l'abaissement d'un seul degré équivaut à une compression qui varie de 60 à 66 atmosphères, selon que le point de départ est la température 0° ou celle de l'ébullition du mercure.

§ 3. DILATATION DE L'EAU. — TEMPÉRATURE DE SON MAXIMUM DE DENSITÉ.

Nous n'avons rien dit spécialement, dans le paragraphe qui précède, du liquide le plus répandu dans la nature, et dont il nous importe le plus de connaître la façon d'agir, quand on le soumet à l'action de la chaleur : en un mot de l'eau. C'est que l'eau, par une exception singulière, ne se dilate pas, quand on l'échauffe, à tous les degrés de l'échelle thermométrique. Quand on élève la température à partir de son point de fusion,

ou de 0°, elle commence par se contracter jusqu'à 4° environ ; ce n'est qu'à partir de cette température qu'elle se dilate de plus en plus en suivant la loi que nous avons constatée pour les autres liquides.

Cette anomalie a été remarquée pour la première fois par les physiciens de l'Académie del Cimento, vers 1670; observant le niveau de l'eau renfermée dans un tube thermométrique et qu'ils faisaient refroidir, ils virent le niveau du liquide, qui avait d'abord descendu, se mettre à remonter un peu avant d'arriver à la congélation. Plus tard, Hooke attribua ce phénomène à un accroissement plus rapide de la contraction du verre, et son opinion, d'abord adoptée par divers savants, fut combattue par Blagden, qui constata un semblable maximum de densité dans un mélange d'eau et de sel. Comme ce mélange ne se congèle qu'à une température inférieure à 0°, et que le point de maximum de condensation se trouve à même distance de la congélation que pour l'eau pure, le phénomène parut vraisemblablement indépendant de l'enveloppe.

L'expérience suivante, due au physicien écossais Hope et qu'on répète encore dans les cours, met d'ailleurs hors de doute cette indépendance et prouve que le phénomène est bien propre à l'eau elle-même. On entoure d'un manchon rempli de glace le haut d'une éprouvette pleine d'eau à une température supérieure à 4°, et qui porte, au-dessus et au-dessous du manchon, deux thermomètres horizontaux (fig. 49). Les réservoirs de ces deux thermomètres indiquent, à tout instant, la température de la couche d'eau qui les entoure. Or voici ce qui arrive et ce que l'on constate aisément. Les couches supérieures de l'eau se refroidissent peu à peu et d'une manière continue, et le thermomètre qui s'y trouve plongé s'abaisse au-dessous de 4° jusqu'à 0°, tandis que le thermomètre inférieur, après s'être abaissé à 4°, reste stationnaire. Cette expérience montre que les couches les plus élevées, en se refroidissant jusqu'à 4°, devenant plus lourdes que les couches inférieures, tombent au fond de l'éprouvette et sont rempla-

cées par celles-ci, que la glace refroidit à son tour. Mais quand leur température est plus basse que 4°, elles restent à la partie supérieure, comme le prouvent les indications des deux thermomètres, ce qui dénote leur plus grande légèreté spécifique.

Cette expérience suffit pour constater le fait, mais non pour déterminer avec exactitude la température précise du point où l'eau acquiert son maximum de densité. On y est parvenu par diverses méthodes, les unes consistant à prendre la densité du liquide en faisant varier la température de part et d'autre du point critique, les autres en cherchant directement la dilatation de l'eau par la comparaison de thermomètres à eau et à mercure, ce qui exige, comme nous l'avons vu, la connaissance exacte de la dilatation absolue du mercure. Hallstrom par la première méthode a trouvé 4°,1 pour la température du maximum de densité. Despretz, en employant la seconde, a trouvé 4° exactement. M. Frankenheim, en prenant pour base les recherches de M. Isidore Pierre, en a déduit le nombre 3°,9. On voit que 4° est la moyenne des trois déterminations. Comme la dilatation varie très lentement de part et d'autre du point où le maximum est atteint, on comprend qu'il soit difficile de décider quel nombre est le plus précis. Le tableau suivant, emprunté au travail de Despretz, donne les volumes et les densités de l'eau pour diverses températures au-dessus et au-dessous de zéro, l'unité de volume et de densité étant celle de l'eau à 4° [1].

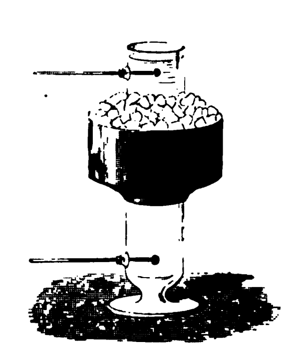


Fig. 49. — Expérience prouvant que l'eau se contracte de 0° à 4°.

1. On verra plus loin que l'eau peut être abaissée sans se solidifier jusqu'à 12 degrés au-dessous de 0. Elle continue à se dilater jusqu'à cette température extrême. Le tableau qui suit donne, jusqu'à — 5°, la valeur de cette dilatation de l'eau non congelée et de sa densité décroissante jusqu'à la même limite. La glace se contracte, au contraire, à ces mêmes températures.

Températures.	Volumes.	Densités.
— 5°	1,0006987	0,999302
— 4°	1,0005619	0,999437
— 3°	1,0004222	0,999577
— 2°	1,0003077	0,999692
— 1°	1,0002138	0,999786
0°	1,0001269	0,999873
1°	1,0000730	0,999927
2°	1,0000331	0,999966
3°	1,0000083	0,999999
4°	1,0000000	1,000000
5°	1,0000082	0,999999
6°	1,0000309	0,999969
7°	1,0000708	0,999929
8°	1,0001216	0,999878
9°	1,0001870	0,999813
10°	1,0002684	0,999731
15°	1,0008951	0,999125
100°	1,04315	0,958634

L'eau de mer a, comme l'eau pure, un maximum de densité; il en est de même de quelques dissolutions salines aqueuses. Mais Despretz a reconnu que pour ces liquides la température du maximum baisse plus rapidement que le point de congélation. L'eau de mer qui se congèle à —1°,70 a son maximum de densité à —3°,67; une dissolution de sel marin dont le point de congélation est —2°,12 a son maximum à —4°,75. Il faut donc, pour que le maximum puisse être observé, que l'on prenne les précautions nécessaires pour amener le liquide à cette température sans qu'il change d'état. L'eau de la mer étant toujours agitée, la congélation a toujours lieu avant qu'elle se soit assez refroidie pour atteindre la température plus basse du maximum.

§ 4. TEMPÉRATURE DES LACS PROFONDS. — PUITS DE GLACE.

Tous les liquides, excepté l'eau et quelques dissolutions aqueuses, se contractent donc, en se refroidissant, jusqu'au point où, comme nous le verrons plus loin, ils changent d'état

et se solidifient. Cette propriété donne lieu, dans la nature, à certains phénomènes dont nous allons dire un mot.

Le premier phénomène est la constance de la température de l'eau, en toutes saisons, au fond des lacs d'une grande profondeur. Il a été constaté par de Saussure : cette température est égale à 4°, c'est-à-dire précisément à celle du maximum de densité de l'eau. L'explication en est aisée, si l'on rapproche le fait de la condition d'équilibre des liquides superposés, qui exige que les couches soient rangées du haut en bas dans l'ordre des densités croissantes. L'expérience de Hope, décrite plus haut, montre en petit ce qui se produit en grand dans la nature.

En effet, lorsque, à l'approche de l'hiver, l'abaissement de température amène les couches superficielles de l'eau du lac à se refroidir jusqu'à 4°, ces couches deviennent plus denses que celles qui se trouvent au-dessous ; elles descendent au fond et sont remplacées par les couches plus chaudes et plus légères qui se refroidissent et tombent à leur tour. Peu à peu donc les couches profondes du lac se trouveront constituées d'eau à 4° ; et si le refroidissement de la surface continue de 4° à 0°, il est évident que l'équilibre s'établira de façon que ce soit précisément l'eau la plus froide ou la moins dense qui occupera les points les plus élevés, la température allant en croissant d'un point voisin de 0° jusqu'à 4°, qui sera la température des couches les plus profondes. Le lac pourra se congeler à la superficie, sur une épaisseur plus ou moins grande, sans que cesse l'équilibre dont nous venons de parler.

Si le lac n'a qu'une faible profondeur, l'abaissement de température de la surface pourra atteindre peu à peu les couches inférieures, qui alors, au lieu de rester à 4°, pourront descendre à 3°, à 2°, etc., mais en conservant l'ordre de superposition qui laisse au fond l'eau la plus chaude et aussi la plus dense, tant qu'on se trouve dans les limites comprises entre 0° et 4°.

Lorsque, par le retour des chaleurs, les couches superfi-

cielles du lac reprennent une température plus élevée, elles ne la communiquent que lentement aux couches inférieures, et, dans l'hypothèse d'une grande profondeur, cette communication n'a pas le temps d'atteindre le fond avant le retour de l'hiver.

D'après des sondages thermométriques effectués, il y a quelques années, dans les lochs écossais par M. Buchanan, il semblait que les résultats trouvés par de Saussure n'étaient pas complètement confirmés par l'observation. M. Buchanan avait vu, dans le Loch Lomon, la température de l'eau, qui était de 0° à la surface, s'élever graduellement jusqu'à 2°,4 à 20 mètres de profondeur, mais sans monter plus haut. Mais M. Forel, pendant l'hiver de 1879-1880, a fait des recherches sur le même sujet dans les lacs de Morat et de Zurich. Voici les résultats de ses mesures, et les conclusions qu'il en tire sont, comme on va voir, entièrement conformes à l'explication jusqu'alors adoptée :

« 1. *Lac de Morat.* Superficie, 27^{kil},4; profondeur maximum, 45 mètres. Le lac a été pris par la glace dans la nuit du 17 au 18 décembre. Épaisseur de la glace, 23 décembre, 11 centimètres; 1er février, 36 centimètres.

Profondeur en mètres.	Température du 28 déc. 1879.	Température du 1er fév. 1880.
0^{m}	0°,36	0°,35
5^{m}	1°,60	1°,90
10^{m}	2°,00	2°,00
15^{m}	2°,23	2°,45
20^{m}	2°,46	2°,50
25^{m}	2°,60	2°,50
30^{m}	2°,66	2°,40
35^{m}	2°,75	2°,55
40^{m}	2°,70	2°,70
Moyennes	2°,15	2°,15

« 2. *Lac de Zurich.* Superficie, 87^{kil},8 ; profondeur maximum, 141 mètres. Le lac a été pris par la glace pendant deux jours à la fin de décembre, puis de nouveau et définiti-

vement le 21 janvier. Épaisseur de la glace le 25 janvier, 10 centimètres.

Profondeur.	Température.	Profondeur.	Température.
0m.	0°,2	70m.	3°,7
10m.	2°,6	80m.	3°,8
20m.	2°,9	90m.	3°,8
30m.	3°,2	100m.	3°,9
40m.	3°,5	110m.	3°,9
50m.	3°,6	120m.	4°,0
60m.	3°,7	133m.	4°,0

« De l'étude de ces chiffres, je tire les conclusions suivantes :

« 1° L'ancienne théorie de la congélation des lacs, qui admet un refroidissement progressif de toute la masse jusqu'à 4° C, puis un refroidissement des couches superficielles, qui se stratifient de 4° à 0°, suivant leur ordre de densité, cette ancienne théorie est exacte.

« 2° La pénétration du froid dans les couches superficielles peut descendre jusqu'à 110 mètres de profondeur (lac de Zurich).

« 3° C'est en raison de son peu de profondeur que le Loch Lomon n'a montré à M. Buchanan que 2°,4 et non pas 4°. »

Un autre phénomène naturel dont l'explication se rattache au fait du maximum de densité de l'eau à 4°, est celui des *puits de glace*. On donne ce nom à des cavités de forme généralement cylindrique qu'on trouve, dans les Alpes, à la surface des masses de glace constituant les glaciers. En examinant le fond de ces puits, on y aperçoit toujours un corps solide, une pierre, un morceau de bois, des feuilles. Voici comment on explique la formation de l'une de ces cavités. La surface de la glace, exposée aux rayons solaires, se fond uniformément, mais avec lenteur, quand la température de l'air est elle-même inférieure à 0°. Mais si un corps étranger est déposé sur la glace, la chaleur du soleil élève sa température et fait fondre la glace au-dessous et autour de lui, avec une plus grande rapidité que dans les autres points. Il se forme donc sous le corps une

cavité qui se remplit de l'eau de fusion. La température de celle-ci, là où elle est exposée au rayonnement solaire, s'élève peu à peu jusqu'à 4°, et comme sa densité augmente, elle descend au fond du trou, et se trouve remplacée par l'eau plus froide et plus légère. Par son contact avec la glace, elle lui cède une partie de sa chaleur, produit une nouvelle quantité d'eau de fusion; mais, en refroidissant ainsi, elle devient plus légère et remonte à la surface. La cavité une fois formée augmente donc progressivement de profondeur, et le corps étranger qui lui a donné naissance reste au fond, témoignant par sa présence de l'origine et de la cause du phénomène.

CHAPITRE V

DILATATION DES GAZ

§ 1. MESURE DU COEFFICIENT DE DILATATION DES GAZ PAR LA MÉTHODE DE GAY-LUSSAC.

Que la dilatation des gaz soit, pour une même élévation de température, beaucoup plus considérable que celle des liquides et, à plus forte raison, que celle des solides, c'est un fait très anciennement connu et qui explique pourquoi les premiers thermoscopes imaginés étaient fondés sur la dilatation de l'air. On savait, par une expérience facile, qu'un ballon fermé et plein d'air se brise quand on élève trop sa température; qu'une vessie se gonfle et éclate dans les mêmes circonstances. Les mesures que nous avons déjà données des coefficients de dilatation des liquides et des solides nous ont fait voir que le mercure, le plus dilatable des liquides, augmente son volume de 179 dix-millièmes quand on le porte de 0° à 100°, tandis que le plùs dilatable des métaux, le zinc, ne s'accroît que de 102 dix-millièmes pour la même élévation de température. L'air, dans les mêmes conditions, se dilate de 3665 dix-millièmes, de plus du tiers de son volume primitif : c'est près de 36 fois autant que le zinc, plus de 20 fois autant que le mercure. Cette proportion est à peu près la même pour tous les gaz, ainsi que nous allons le voir en décrivant les principaux procédés qui ont servi aux physiciens pour déterminer leurs coefficients de dilatation. Gay-Lussac, à qui revient l'honneur

d'avoir fait les premières déterminations exactes, trouva pour tous les gaz un nombre un peu plus fort que celui qui est admis aujourd'hui.

Avant cet éminent physicien, diverses tentatives avaient eu lieu dans le but de mesurer la dilatation des gaz. Citons celles de Hauksbee et d'Amontons, les premières en date, puis celles de Priestley, de Monge et Berthollet, de Guyton et Prieur. Mais les conclusions de ces recherches multipliées ne s'accor-



Fig. 50. — Gay-Lussac.

daient pas entre elles. On sait aujourd'hui que la divergence des résultats était due en grande partie à l'insuffisance des procédés de dessèchement des gaz; l'humidité qu'ils conservaient dans les expériences, et la formation de vapeurs sous l'influence de la chaleur, étaient des causes de perturbation et d'erreur alors inévitables. Ainsi que le dit fort justement Lamé, « on ne connaissait pas alors les lois de formation des vapeurs, et cette circonstance négligée s'opposait à ce que les expériences fussent comparables entre elles ». Gay-Lussac

en France, Dalton en Angleterre parvinrent les premiers à découvrir les lois de la dilatation des gaz : le premier notamment fut longtemps considéré comme ayant donné leurs véritables formules et la vraie valeur du coefficient de dilatation commun. Voici l'énoncé des trois lois auxquelles ils parvinrent chacun de leur côté, et qui ont été longtemps connues dans la science sous le nom de lois de Gay-Lussac :

Première loi : *Tous les gaz se dilatent uniformément de* 0 *à* 100 *degrés.*

Seconde loi : *La dilatation des gaz est indépendante de la pression.*

Troisième loi : *La dilatation commune des gaz entre* 0 *et* 100 *degrés est les* 375 *millièmes de leur volume à* 0°, *ou bien leur coefficient de dilatation est égal pour* 1 *degré à* 0,00375, *c'est-à-dire à* $\frac{1}{267}$.

Voici comment l'illustre physicien disposait ses expériences. Nous prenons pour exemple celle qui avait pour objet la dilatation de l'air (fig. 51). Ayant préparé un tube thermométrique muni d'un réservoir sphérique et d'une longue tige parfaitement calibrée, divisée dans toute sa longueur en parties d'égale capacité, il calcula, comme nous l'avons vu en décrivant le thermomètre, le rapport exact de la capacité d'une division à celle du réservoir. Il l'emplit alors de mercure, qu'il soumit à l'ébullition de manière à le purger complètement d'air et d'humidité. En cet état, la tige fut ajustée à l'extrémité d'un large tube C rempli de chlorure de calcium, puis renversée verticalement. Introduisant un fil de platine dans la tige, et imprimant quelques secousses, le mercure sortait du tube et se trouvait à mesure remplacé par l'air qui glissait dans l'espace entre le fil de platine et le mercure. On retirait le fil en ayant soin de laisser une goutte de mercure servant d'index, et le réservoir se trouvait ainsi rempli d'air desséché par son passage à travers le chlorure de calcium. Le tube ainsi préparé était introduit dans une cuve BB, d'abord pleine de glace en fusion ou à 0°; on notait la position de l'index, puis on portait

la cuve sur un fourneau pour en élever la température. Deux thermomètres *t*, *t* indiquaient celle-ci, et la marche de l'index, visible au dehors, donnait la mesure de la dilatation pour des températures de plus en plus élevées. Gay-Lussac avait ainsi les volumes d'une même masse d'air à 0° et à un nombre de degrés T. En corrigeant ce dernier volume de la dilatation du verre, il en déduisait la dilatation vraie du gaz pour T degrés et par suite la dilatation pour 1 degré, c'est-à-dire le coefficient moyen de dilatation entre 0 et T[1]. Si la pression barométrique restait la même pendant toute la durée

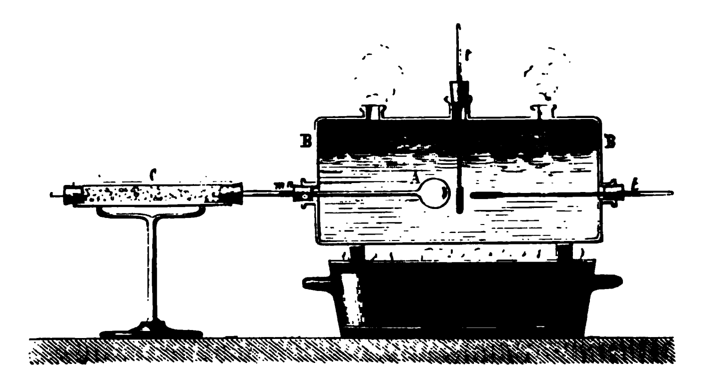


Fig. 51. — Appareil de Gay-Lussac pour la mesure de la dilatation des gaz.

de l'expérience, il n'y avait pas de correction à faire de ce chef; dans le cas contraire, le second volume mesuré devait être ramené à la pression observée au début.

C'est en opérant ainsi que Gay-Lussac trouva une dilatation uniforme entre 0° et 100°, et un même coefficient de dilatation pour tous les gaz, dans ces limites. C'est à Davy que l'on doit

1. Soit V_0 le volume occupé par l'air à 0° exprimé en capacités d'une division du tube, *n* le nombre des divisions parcourues par l'index de 0° à T. Si α est le coefficient de dilatation de l'air, $V_0(1+\alpha T)$ sera le volume de l'air dilaté; $V_0 + n$ est le volume apparent qu'il occupe et qu'il faut augmenter de la dilatation du verre pour avoir le volume réel de l'enveloppe à T°, ce qui donne $(V_0+n)(1+kT)$, si *k* est le coefficient de dilatation du verre. Alors l'équation

$$V_0(1+\alpha T) = (V_0+n)(1+kT)$$

permettra de calculer le coefficient α. Il faut introduire le facteur $\frac{h}{h'}$ dans le second membre si la pression a varié.

d'avoir reconnu que la dilatation est indépendante de la pression.

Dalton était parvenu, à peu de chose près, au même résultat en ce qui concerne la valeur du coefficient de dilatation, qu'il trouvait égal à 0,00372; mais il l'interprétait autrement, en admettant que la dilatation suivait une progression géométrique, au lieu que d'après Gay-Lussac elle se fait par voie de progression arithmétique[1].

Après Gay-Lussac, Dulong et Petit, puis Pouillet firent sur le même sujet des recherches nouvelles[2]. Dulong et Petit vérifièrent la première loi de Gay-Lussac, pour l'air et l'hydrogène, depuis 37° au-dessous de 0 jusqu'à 360°. Reconnue exacte, dans ces limites, pour des gaz aussi différents que l'air et l'hydrogène, on l'admit à plus forte raison pour tous les autres. Mais les mêmes physiciens trouvèrent que, pour un même gaz, l'uniformité de dilatation, exacte entre — 36° et 100°, ne l'est plus pour les températures supérieures, toujours mesurées à l'aide du thermomètre à mercure. A partir de 100°, les dilatations ont des valeurs décroissantes pour d'égales augmentations de température, ce qu'il faut interpréter seulement en ce sens, que la loi de dilatation au delà de 100° n'est pas la même pour le mercure que pour les gaz : un thermomètre à mercure indiquerait des températures plus élevées qu'un thermomètre à gaz.

1. V étant le volume à 0°, les volumes à 1, 2, 3.... t degrés étaient égaux, selon Dalton, aux termes de la série

$$V, \quad V+\frac{1}{267}, \quad \left(V+\frac{1}{267}\right)^2, \quad \left(V+\frac{1}{267}\right)^3, \quad \ldots \quad \left(V+\frac{1}{267}\right)^t,$$

tandis que, selon Gay-Lussac, c'étaient ceux-ci :

$$V, \quad V+\frac{1}{267}, \quad V+\frac{2}{267}, \quad V+\frac{3}{267}, \quad \ldots \quad V+\frac{t}{267}.$$

Sous la réserve de la valeur numérique du coefficient, c'est cette seconde série qui a été adoptée par les physiciens.

2. Les recherches de Gay-Lussac datent de l'année 1801 ; celles de Dulong et Petit de 1815 et les travaux de Pouillet ont été effectués en 1836.

§ 2. DILATATION DES GAZ. — EXPÉRIENCES DE V. REGNAULT.

Tel était encore, sur ce point, l'état de la science en 1835, époque où un physicien suédois, professeur à l'Université d'Upsal, Rudberg, fit des recherches qui tendirent à prouver que les lois de Gay-Lussac n'avaient pas la rigueur qu'on leur avait jusqu'alors attribuée. En prenant des précautions plus grandes pour dessécher l'air sur lequel il opérait, Rudberg arriva à un nombre très notablement différent de celui qui était admis jusqu'alors pour le coefficient de dilatation. Il trouva 0,00365 au lieu de 0,00375.

Mais V. Regnault, en étudiant les expériences de Rudberg, reconnut, dans le détail des opérations, des causes d'erreur dont jusqu'alors on n'avait pu tenir compte. Il résolut de reprendre à nouveau les recherches de Gay-Lussac, de les étendre à tous les gaz, et imagina dans ce but des procédés et des appareils plus parfaits, qui le conduisirent aux résultats que nous allons indiquer brièvement, en donnant une idée sommaire des méthodes nouvelles.

Le ballon A (fig. 52), destiné à contenir l'air ou le gaz à étudier, est placé dans une étuve en laiton B, qu'on remplira d'abord de glace fondante, puis d'eau pouvant être portée à l'ébullition par une lampe à alcool. Le tube très étroit qui termine le ballon peut être mis en communication, en C, avec un manomètre à air libre MN, et d'autre part par un tube D avec une série de tubes T renfermant des substances desséchantes, chlorure de calcium, pierre ponce imbibée d'acide sulfurique, etc. A l'aide d'une pompe, on fait le vide dans le ballon à travers les tubes T, et on y introduit une première fois de l'air qui perd son humidité par ce passage. On répète la même opération un certain nombre de fois, puis on laisse quelques instants le ballon en communication avec l'atmosphère, de façon que la pression du gaz intérieur soit précisé-

ment égale à la pression atmosphérique ; on ferme alors à la lampe, en D, le tube de communication. Le ballon A, rempli de gaz parfaitement sec et ne contenant plus sur ses parois aucune trace d'humidité, ne se trouve plus en communication qu'avec le manomètre, dont les deux branches ont le mercure au même niveau.

On verse du mercure dans la branche ouverte du manomètre, ou on en ôte de l'autre branche par le robinet R, jusqu'à ce que le niveau commun affleure à un point de repère M. On a ainsi un volume de gaz déterminé et connu à 0°, puisque pendant toutes ces opérations l'étuve était remplie de glace en fusion, et à la pression atmosphérique connue par le baromètre.

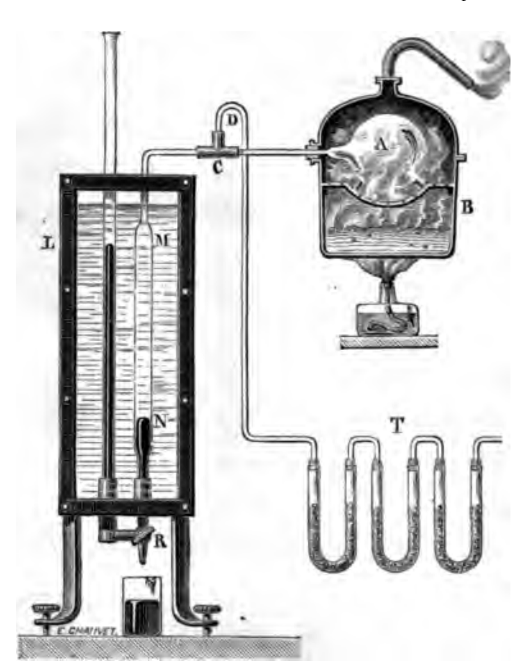


Fig. 52. — Appareil Regnault pour la mesure de la dilatation des gaz à pression constante.

Cette première phase de l'expérience terminée, on procède à la seconde. On enlève la glace de l'étuve, et on la remplace par de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Le gaz se dilate, refoule le mercure dans la branche M du manomètre jusqu'en un point N. Alors on ramène l'égalité de niveau dans les deux branches du manomètre, en laissant écouler du mercure par le robinet R. De cette façon, la pression du gaz est toujours égale à la pression extérieure, mais son volume a varié et on peut aisément jauger l'augmentation de volume dans le tube MN préalablement divisé en parties d'égale capacité. On connaît d'ailleurs la température de cette partie du gaz : c'est la température de l'eau qui l'entoure

dans la caisse L (fig. 52). On peut alors écrire une équation qui permet de calculer le coefficient de dilatation du gaz *à pression constante et à volume variable*.

Par une seconde méthode, dont nous allons dire un mot, Regnault a obtenu des résultats qui ne sont point identiques à ceux de la première, bien que la différence soit peu grande.

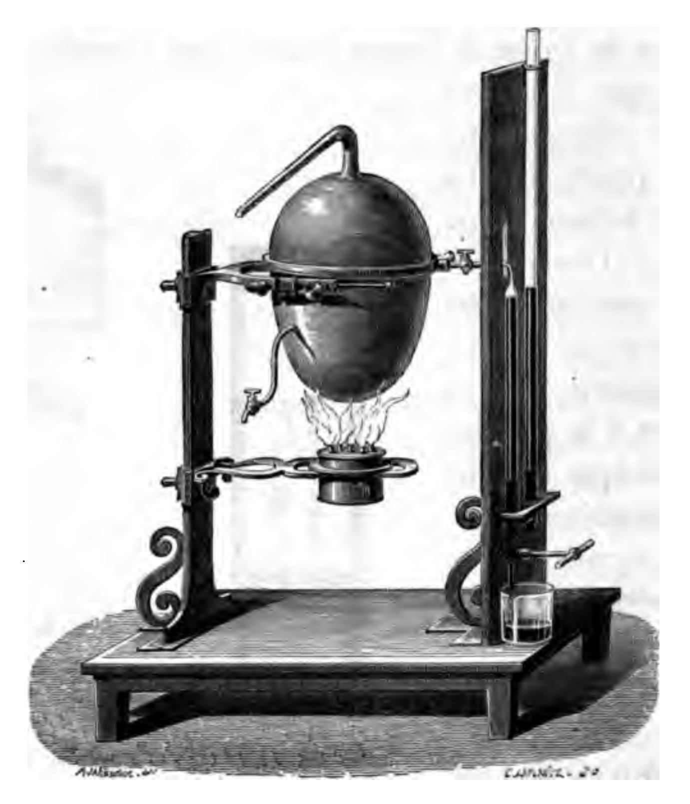


Fig. 53. — Appareil Regnault pour la mesure de la dilatation des gaz à volume constant.

La préparation du gaz, ainsi que la détermination de son volume et de sa pression à 0°, se faisaient de la même manière que dans l'expérience précédente, et la disposition de l'appareil ne différait que par celle du manomètre, dont les branches avaient le même diamètre et n'étaient point entourées d'eau. La figure 53 fera comprendre sans explication nouvelle la première phase de l'opération. La seconde phase consiste à chauffer l'étuve dont la glace enlevée a été remplacée par de

l'eau, et à porter celle-ci jusqu'à l'ébullition. Le gaz dilaté refoule le mercure du manomètre dont le niveau affleurait, à 0°, à un point de repère marqué. En versant du mercure par la branche ouverte du manomètre, on ramène à ce point de repère le niveau du mercure dans la seconde. On mesure la différence de niveau et on y ajoute la pression extérieure, qui a pu changer dans l'intervalle. Le volume du gaz, dans ces phases de l'expérience, est donc resté constant. On le ramène à ce qu'il serait à 0° par une formule très simple où entre le coefficient de dilatation cherché, ainsi que le coefficient de dilatation du verre. Et comme, dans l'hypothèse de l'exactitude de la loi de Mariotte, les volumes d'un même gaz, à une même température, doivent être inversement proportionnels aux pressions, on peut écrire une équation qui permet de calculer le coefficient ou l'inconnue du problème[1].

On voit que, par cette seconde méthode, c'est la pression qu'on fait varier, tandis que le volume reste sensiblement constant (la différence ne provient que de la dilatation du

1. Le volume du gaz est composé de deux parties : l'une V_0 est celui du ballon plongé dans la glace, l'autre v est celui du tube extérieur qui est à la température ambiante; ce dernier volume, réduit à 0°, serait $\frac{v}{1+\alpha t'}$, en appelant α le coefficient cherché. Le volume total à 0° est donc $V_0 + \frac{v}{1+\alpha t'}$.

T étant la température d'ébullition de l'eau dans la seconde partie de l'expérience, K le coefficient de dilatation du verre et t' la température extérieure, le volume du gaz ramené à 0 comprendra deux termes :

$$\frac{V_0(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'}.$$

H et H' étant les pressions extérieures dans les deux phases de l'expérience, h la hauteur du mercure au-dessus du repère M, l'équation sera

$$H\left(V_0 + \frac{v}{1+\alpha t}\right) = (H'+h)\left(\frac{V_0(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'}\right).$$

On résout cette équation par approximations successives, en supposant d'abord nuls les termes contenant v. On trouve ainsi une valeur approchée de α. On la substitue dans les termes en question, et on a une nouvelle équation qui donne une valeur plus exacte, et ainsi de suite.

L'équation relative à la première méthode ne diffère de celle qu'on vient de lire que par le facteur $H'+h$, qui se réduit à H'. Dans le second nombre, au lieu de v, il faut écrire v', qui désigne les volumes réunis du tube extérieur à l'étuve et du tube MN du manomètre.

verre). C'est donc la dilatation à volume constant et à pression variable.

Voici les principaux résultats obtenus par M. Regnault en suivant l'une ou l'autre méthode :

COEFFICIENTS DE DILATATION DES GAZ ENTRE 0° ET 100°.

Noms des gaz.	Sous volume constant.	Sous pression constante.
Air	0,003665	0,003670
Hydrogène.	0,003667	0,003661
Azote	0,003668	»
Oxyde de carbone	0,003667	0,003669
Protoxyde d'azote	0,003676	0,003719
Acide carbonique	0,003688	0,003710
Cyanogène.	0,003829	0,003877
Acide sulfureux	0,003845	0,003903

Le tableau qui précède montre que les coefficients de dilatation des gaz varient d'un gaz à l'autre, selon la méthode employée pour les déterminer. De plus, ils sont loin d'être égaux pour tous les gaz. Pour l'air, entre 0 et 100°, la valeur trouvée par Gay-Lussac doit être sensiblement abaissée. Au lieu de 0,00375, ou de la fraction $\frac{1}{267}$, c'est 0,003665, ou la fraction $\frac{1}{270}$. Regnault a constaté en outre que le coefficient n'est pas indépendant de la pression ou de la densité initiale : excepté pour l'hydrogène, il augmente avec la pression. Pour l'air, par exemple, le coefficient augmente de 0,003648 à 0,003709, quand la pression croît de 109 millimètres à 3655 millimètres.

Les lois formulées par Gay-Lussac ne sont donc point exactes. Toutefois il importe de remarquer que, pour les gaz qu'on n'avait pu encore liquéfier, et que, pour cette raison, on nommait *permanents*, l'air, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, la différence des coefficients ne porte que sur le dernier chiffre et que pour tous on peut le dire égal à 0,00367 ou à $\frac{1}{273}$. De même, la variation avec la pression ne devient bien sensible que pour les gaz liquéfiables. Du reste, ces résultats sont d'accord avec ce que l'on sait de l'inexactitude de la loi de Mariotte. « Il est probable, dit M. Jamin, que si tous les gaz

suivaient la loi de Mariotte, ils auraient une dilatation commune, égale à peu près à celle de l'hydrogène et indépendante de leur pression; mais comme ils suivent une loi de compressibilité en général plus rapide, qui est variable avec leur nature et qui décroît quand la température augmente, ils possèdent une dilatation inégale, d'autant plus grande qu'ils sont plus



Fig. 54. — Victor Regnault.

compressibles, qui croît avec la pression, et l'on est obligé de distinguer deux coefficients, l'un à volume constant, l'autre à pression constante. Toutefois, si c'est là la vérité expérimentale, on a pu remarquer que les différences entre les diverses dilatations sont très faibles[1]. » C'est à la même conclusion qu'était conduit Verdet, lorsqu'il disait : « Il est probable que la raré-

1. *Cours de Physique de l'École polytechnique*, t. I.

faction et l'élévation de température tendent à rapprocher un gaz quelconque d'un *état gazeux parfait*, où il suivrait rigoureusement la loi de Mariotte et où ses deux coefficients de dilatation deviendraient égaux et indépendants de la pression. Il est également probable que la valeur commune de ces deux coefficients de dilatation serait indépendante de la nature du gaz. »

V. Regnault, en présentant les résultats de ses belles expériences à l'Académie des sciences, et en constatant que ces résultats ne confirmaient point les deux lois fondamentales de la théorie des gaz, telles que le génie de Gay-Lussac les avait découvertes, disait lui-même dès 1842 : « Faut-il conclure de là que ces lois doivent être à l'avenir bannies de la science? Je ne le pense pas. Je crois que ces lois, de même que toutes celles qui ont été reconnues sur les gaz, la loi des volumes, etc., doivent être considérées comme vraies *à la limite*, c'est-à-dire qu'elles s'approcheront d'autant plus de satisfaire aux résultats de l'observation que l'on prendra les gaz dans un plus grand état de dilatation. Ces lois s'appliquent à un état gazeux parfait, dont les gaz que nous présente la nature s'approchent plus ou moins, suivant leur nature chimique, suivant la température à laquelle on les considère et qui peut être plus ou moins éloignée des points où il y a changement d'état, enfin suivant leur état de moins ou de plus grande compression[1]. »

Ce que l'illustre physicien dit des lois physiques des gaz, nous l'avons déjà remarqué d'autres lois naturelles. Les lois de Képler, par exemple, ne sont vraies que pour le cas idéal où les planètes n'exerceraient pas les unes sur les autres les actions perturbatrices que l'observation et la théorie ont également révélées et qui modifient à tout instant la forme et les dimensions de leurs orbites et leurs vitesses respectives. Cette différence entre l'énoncé rigoureux de ces lois et les phénomènes réellement observés, n'ôte rien à l'importance de la découverte ni au mérite du grand homme qui l'a su faire.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1842, t. II, p. 597.

§ 3. THERMOMÈTRE ET PYROMÈTRE A AIR. — LE ZÉRO ABSOLU DE TEMPÉRATURE.

On a vu quels sont les avantages et les inconvénients du thermomètre à mercure. La commodité de son emploi, la facilité de sa construction le rendent précieux pour la plupart des observations ordinaires; d'autre part, il a le défaut grave que ses indications ne sont pas toujours comparables entre elles, à cause des déplacements des points fixes; deux thermomètres à mercure ne sont pas non plus toujours comparables, en raison des variations de la dilatation du verre, qui ne sont pas les

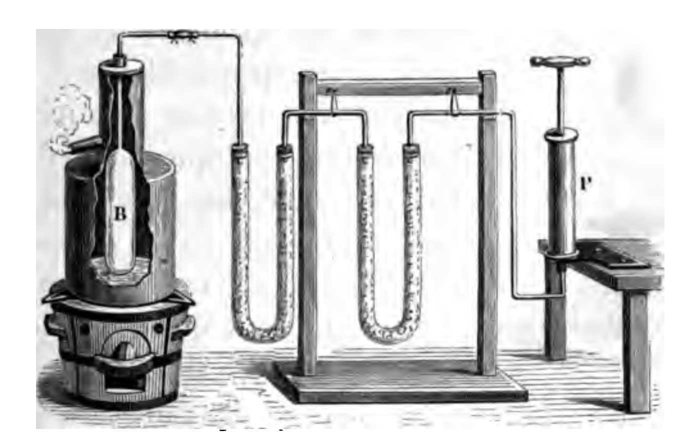


Fig. 55. — Mesure d'une température par le thermomètre à air.

mêmes d'une enveloppe à l'autre. Or la grandeur du coefficient de dilatation d'un gaz comparée à celle des coefficients de dilatation des liquides et des solides, fait que les influences dont nous parlons ne produisent dans les changements de volume de ce gaz que des erreurs tout à fait négligeables.

En prenant surtout, pour construire des thermomètres fondés sur la dilatation des gaz, un gaz permanent, l'air sec par exemple, on est assuré que sa dilatation restera constante dans les limites de température observables. L'hydrogène dont le coefficient ne varie point avec la pression serait encore préférable à l'air sous ce rapport, s'il n'était pas d'un emploi plus

incommode; mais, d'après les expériences de Regnault, un thermomètre à air et un thermomètre à hydrogène restent parfaitement d'accord de 0° à 350°.

Tout appareil qui sert à la mesure de la dilatation des gaz peut être employé comme thermomètre à air. Tels sont ceux que nous avons décrits dans le paragraphe précédent et que représentent les figures 52 et 53. En effet, en procédant, dans chaque opération, de la même manière que s'il s'agissait de déterminer le coefficient de l'air, on arrive à une relation entre ce coefficient, la pression et la température. Cette relation (voir les notes des pages 134 et 139) permet de calculer l'une de ces quantités au moyen des deux autres, quand elles sont connues. On peut donc prendre pour inconnue la température, puisque le coefficient de l'air est calculé une fois pour toutes et que la pression ou le volume du gaz s'obtiennent par l'expérience même.

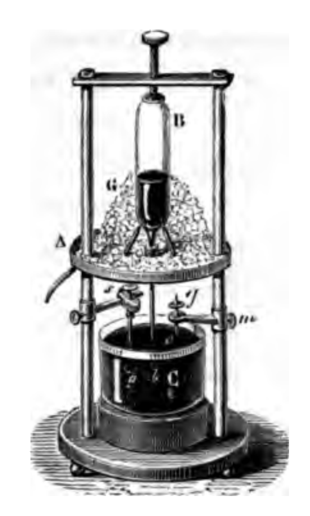


Fig. 56. — Détermination de la force élastique de l'air à 0°.

Il résulte de là qu'on peut employer deux sortes de thermomètres à air, selon que l'on détermine les variations du volume du gaz sous pression constante, ou celles de la pression sous volume constant. Regnault donne la préférence à cette seconde méthode, parce que dans la première la masse de l'air soumis à l'action de la chaleur diminue à mesure que la température s'élève; celle de l'air qu'une élévation donnée de température fait sortir du réservoir diminue : d'où il suit qu'en ramenant son volume à la température du tube où s'observent les dilatations, ce volume se calcule avec une exactitude décroissante. L'appareil basé sur l'observation des variations de pression n'est pas soumis à cet inconvénient.

On peut aussi employer comme thermomètre à air l'appareil représenté dans la figure 55. Le réservoir B a une forme

lindrique allongée, parce qu'elle est plus favorable que la rme sphérique au prompt établissement de l'équilibre de mpérature entre l'air intérieur et le milieu dont il s'agit de connaître la température. Supposons qu'il s'agisse de la vapeur d'un liquide en ébullition. On place le réservoir dans ce milieu et on le remplit d'air sec avec les procédés et les précautions que nous avons déjà indiqués. Quand il a pris la température de la vapeur, on ferme le tube à la lampe, en observant à ce moment la pression du baromètre. On transporte alors le réservoir sur une cuvette à mercure C, le tube plongé verticalement dans le liquide et maintenu comme le montre la figure 56.

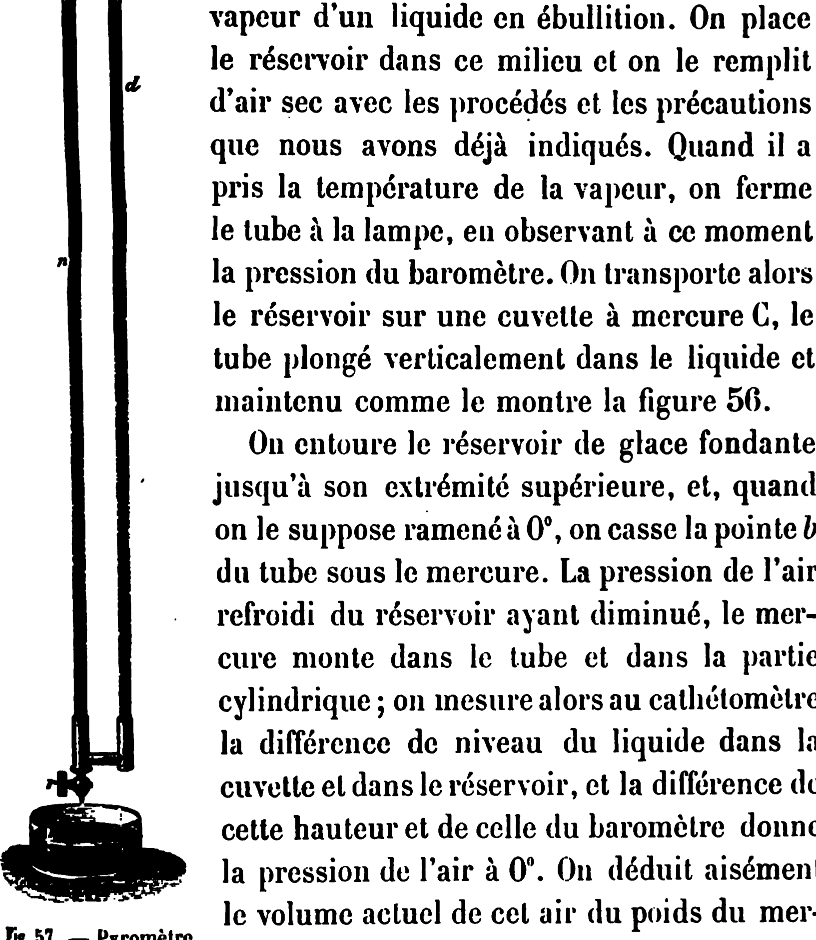


Fig. 57. — Pyromètre à air de Pouillet.

On entoure le réservoir de glace fondante jusqu'à son extrémité supérieure, et, quand on le suppose ramené à 0°, on casse la pointe *b* du tube sous le mercure. La pression de l'air refroidi du réservoir ayant diminué, le mercure monte dans le tube et dans la partie cylindrique ; on mesure alors au cathétomètre la différence de niveau du liquide dans la cuvette et dans le réservoir, et la différence de cette hauteur et de celle du baromètre donne la pression de l'air à 0°. On déduit aisément le volume actuel de cet air du poids du mercure qui a pénétré dans l'appareil.

On a ainsi tous les éléments qui entrent dans la formule, et le calcul donne la température cherchée.

La mesure des températures élevées à l'aide du thermomètre à air exige que le réservoir contenant le gaz soit infusible à ces hautes températures. Le verre ne peut donc plus servir dès qu'on approche de celle où il commence à se ramollir.

Pouillet avait substitué le platine au verre, et son pyromètre à air, que représente la figure 57, avait pour principe la mesure du volume variable de l'air dilaté, sous pression constante. Ce physicien a déterminé ainsi, en degrés centigrades, les températures correspondant aux diverses couleurs que prennent les métaux inaltérables, quand on les chauffe dans une moufle dont le feu est réglé, ou au feu de forge. Voici les résultats qu'il avait obtenus pour l'or, le platine, l'argent, etc. :

Couleurs des métaux incandescents.	Températures correspondantes.
Rouge naissant	525°
Rouge sombre	700°
Cerise naissant	800°
Cerise	900°
Cerise clair	1000°
Orangé foncé	1100°
Orangé clair	1200°
Blanc	1300°
Blanc soudant	1400°
Blanc éblouissant (plus haute température du feu de forge)	1500° à 1600°

Malheureusement le platine a de graves défauts qui ont dû altérer l'exactitude des indications du pyromètre : en premier lieu, il condense de l'air à sa surface, et cet air ne se dégage qu'à partir de 100°; ce défaut peut être corrigé : il suffit de ne mesurer le volume de l'air qu'au-dessus de 100°. Mais, en outre, à une température élevée le platine est perméable aux gaz, et notamment à l'hydrogène, de sorte que, l'appareil étant placé dans un fourneau, dans une flamme contenant de l'hydrogène, ce gaz pénètre par endosmose dans le réservoir et, se combinant avec l'oxygène de l'air, forme de l'eau et altère les indications du pyromètre en diminuant la masse d'air qu'il renferme et qui devrait rester constante[1].

1. C'est à MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost qu'est due la constatation de ce phénomène. Après avoir reconnu l'impossibilité de construire des pyromètres à gaz avec du platine, quand ces pyromètres doivent être mis en contact avec les gaz réducteurs ou l'hydrogène d'un foyer, ces savants ajoutent : « Cette porosité du platine l'empêche peut-être de conserver les gaz à haute température et à haute pression, mais surtout l'endosmose force,

Henri Sainte-Claire Deville a substitué au platine la porcelaine de Bayeux, qui est imperméable et absolument rigide aux températures élevées qu'il voulait mesurer. En effet, des réservoirs de cette substance tenaient le vide absolu à cette température, tout en étant fort éloignés encore de leur point de fusion ou de ramollissement. Ce savant physicien a construit des pyromètres où, au lieu d'air sec, il introduisait de la vapeur d'iode, choisie en raison de sa grande densité.

Le choix du point fixe de la glace fondante pour le zéro de l'échelle des températures a été, nous l'avons vu, tout à fait arbitraire, bien que justifié par des motifs excellents de commodité et de convenance. Nous savons que ce point n'est, en aucune façon, comme il arrive de le croire à des personnes tout à fait étrangères aux plus simples notions de science, la séparation entre deux états opposés de la matière, la chaleur et le froid. Un corps qui est à une température inférieure à 0° conserve une quantité de chaleur très réelle, ainsi que le prouvent les refroidissements qu'il peut subir et les contractions de volume qui leur correspondent. Toutefois on peut se demander si ces diminutions de chaleur peuvent continuer d'une manière indéfinie, et si tout au moins ils ne tendent pas vers une limite telle, que, s'il était possible de l'atteindre, la quantité de chaleur du corps deviendrait nulle. En un mot, on peut se poser la question en ces termes : y a-t-il ou non un *zéro absolu de température?* Cette question, abordée de différentes façons, a été résolue affirmativement, bien qu'on n'ait pu en vérifier la solution par la voie expérimentale.

En admettant qu'il existe des *gaz parfaits*, c'est-à-dire dont les volumes suivent rigoureusement la loi de Mariotte quand la pression varie, et qui se dilatent uniformément quelle que

malgré une pression contraire, les gaz du foyer d'entrer en contact avec l'air du pyromètre. Il se forme alors de l'eau, avec diminution de volume due à la disparition de l'oxygène. » Ainsi la masse de gaz qui, dans le pyromètre en platine, devrait rester constante, varie, et des expériences prouvent que cette diminution peut atteindre 16 pour 100.

soit leur température, et en regardant l'air comme un de ces gaz, on a vu que le coefficient de dilatation, pour une variation de température d'un degré centigrade, est sensiblement égal à la fraction $\frac{1}{273}$. Considérons un volume d'air égal à l'unité à la température du zéro centigrade; porté à une température quelconque t, ce volume deviendra $1+\frac{t}{273}$. Par exemple, chauffé à $+273°$, le volume de l'air en question deviendra 2, ou doublera. Mais si l'on abaisse la température au-dessous de 0, à chaque degré d'abaissement il perdra $\frac{1}{273}$ de sa valeur et il est clair que si cette contraction pouvait continuer jusqu'à $-273°$, elle deviendrait égale au volume même et le résultat serait l'anéantissement du volume. Rien ne prouve sans doute que l'air pourrait subir un refroidissement aussi considérable sans changer d'état, sans se liquéfier ou même se solidifier[1]. Toutefois cette limite inférieure de température est ce qu'on nomme le *zéro absolu*.

On y arrive de même par la considération des pressions. En appelant P la force élastique de l'air à la température de zéro centigrade, à toute autre température t, le gaz continuant à occuper le même volume, la force élastique p ou sa pression sous volume constant sera donnée par la relation

$$p = P\,(1+\alpha t) \qquad \text{ou bien} \qquad p = P\left(1+\frac{t}{273}\right).$$

Or il est évident que si l'on donne à t la valeur $-273°$, le second membre de l'égalité se réduit à 0. En un mot, à cette température de 273 degrés centigrades au-dessous du zéro ordinaire ou de la fusion de la glace, la pression ou la force élastique du gaz serait nulle. Or nous verrons, d'après les idées qui ont cours dans la science sur la constitution des gaz, que

1. On verra bientôt que les deux gaz dont l'air est formé, l'oxygène et l'azote, ont pu être liquéfiés l'un et l'autre. Le refroidissement nécessaire n'a pas dépassé 140 degrés au-dessous de zéro; mais en même temps les gaz subissaient une compression d'un nombre plus ou moins grand d'atmosphères.

leur force élastique, ou, ce qui revient au même, leur force vive moléculaire, est proportionnelle à l'intensité de la chaleur et la mesure. Dès lors, à —273°, cette force vive étant nulle, la chaleur serait nulle aussi. En un mot, le *zéro absolu* de température se trouverait atteint.

Toutefois ce ne sont là que des conditions théoriques. Dans la réalité physique, il est probable que l'air et les autres gaz qui approchent de l'état *gazeux parfait*, n'ont pas à toute température les propriétés qui ont été observées dans les limites de nos expériences. En les refroidissant indéfiniment, on finirait par les liquéfier, et peut-être, comme nous le disions plus haut, à les solidifier, avant que la température de —273° ne fût atteinte. Existe-t-il dans l'univers un lieu de l'espace où un froid aussi intense existe? y a-t-il quelque part de la matière entièrement privée de chaleur ou dont les atomes constituants soient inertes? et si une telle hypothèse est réalisée, comment et par quelles propriétés, sous quelle forme phénoménale la matière dont nous parlons peut-elle se manifester? C'est ce dont il est, croyons-nous, difficile de se faire une idée.

§ 4. MESURE DE LA DENSITÉ DES GAZ.

En décrivant, dans notre premier volume[1], les divers procédés qui servent à déterminer les densités des corps, nous n'avons parlé que des solides et des liquides, et n'avons rien dit de la densité des gaz. C'est que, pour comprendre les méthodes relatives à cette dernière détermination, il était indispensable de connaître les lois de leur dilatation. Le moment est venu où nous pouvons aborder utilement cette question délicate.

La densité d'un corps solide ou liquide ne varie qu'avec la température. Comme on est convenu de prendre pour unité la

1. Voir le § 4 des *Applications de la pesanteur*, t. I du MONDE PHYSIQUE, p. 403.

densité maximum de l'eau (à + 4°) et de calculer celle du corps pour 0°, comme, d'autre part, on opère généralement à une température quelconque, il est clair que les résultats obtenus doivent être corrigés des effets de la température. On a des tables où, à côté des nombres donnant la dilatation de l'eau de degré en degré, sont inscrites les densités correspondantes du même liquide. Les procédés que nous avons décrits, celui de la balance hydrostatique par exemple, donnent la densité du corps à la température de l'expérience. Pour connaître la densité à 0°, il suffira de se rappeler que les densités, à deux températures différentes, sont en raison inverse des volumes[1].

Mais, pour les gaz, la question des densités se complique d'un nouvel élément, qui est celui de la pression. De plus, la densité d'un gaz ne se rapporte plus à celle de l'eau, dont elle ne serait qu'une fraction trop minime ; c'est l'air qui sert de terme de comparaison et qu'on emploie d'ailleurs dans les expériences. Ce qu'on nomme *densité* d'un gaz n'est autre chose que le rapport entre le poids d'un volume déterminé de ce gaz et le poids d'un égal volume d'air sec, pris l'un et l'autre à la température 0° et sous la pression normale de 760 millimètres.

D'après cette définition, il semble qu'il suffirait de faire deux pesées, l'une de l'air dans un ballon de verre par exemple, l'autre du gaz dans le même ballon. Cette méthode, qui a été employée par Biot et Arago, exige des précautions multipliées pour éviter les causes d'erreur. Il faut peser d'abord avec soin le ballon vide, qui doit être absolument purgé de toute trace d'air ou d'humidité; ensuite y introduire successivement l'air desséché, puis le gaz dont on veut trouver la densité, en mesurant avec la plus grande exactitude possible la température du gaz et sa pression ; enfin noter la pression atmosphérique pour chacune des pesées successives, puisque celles-ci se font dans l'air et doivent être corrigées du poids de l'air déplacé (principe

1. Soit D la densité à la température t, k le coefficient de dilatation cubique du corps, la densité à 0° sera égale à D $(1 + kt)$. Par exemple, ayant trouvé 7,186 pour la densité du zinc à + 15°, la densité du zinc à 0° sera 7,190.

d'Archimède). Cette méthode, très simple en théorie, est donc en réalité fort compliquée. Regnault a imaginé une autre méthode, qui consiste à éliminer les causes d'erreur principales.

Dans ce but, il fit choix de deux ballons du même verre d'environ 10 litres de capacité chacun, et munis d'armatures à robinet. Il les suspendit pleins d'eau au plateau d'une forte balance hydrostatique et les équilibra. Plongés tous les deux, en cet état, dans une cuve d'eau, les deux ballons éprouvèrent des poussées inégales provenant de ce que leur volume n'était point identique. L'équilibre fut rompu pendant l'immersion, et il fallut, pour le rétablir, ajouter du côté du plus grand un certain poids. En faisant un tube de verre pesant précisément ce poids, et l'accrochant au plus petit ballon, il obtint deux récipients aussi égaux que possible dans leur volume extérieur, et par conséquent devant subir pendant toute la durée des expériences les mêmes poussées, quels que fussent d'ailleurs la pression barométrique, l'état hygrométrique et la température de l'air.

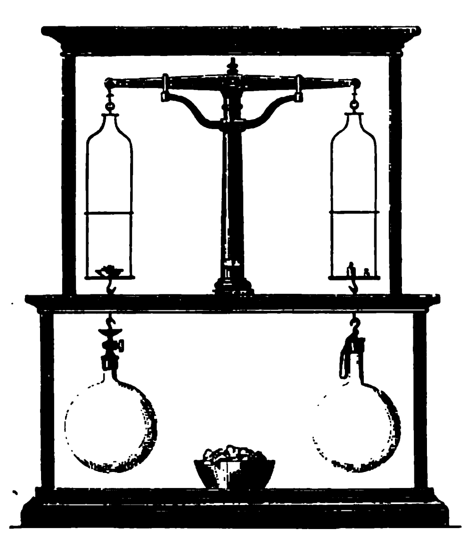


Fig. 58. — Mesure de la densité de gaz. Méthode des ballons compensateurs de Regnault.

Les deux ballons ainsi préparés furent suspendus aux deux plateaux d'une balance, fermés et équilibrés (fig. 58). Il est évident qu'en prenant l'un d'eux pour y faire le vide, et en y introduisant successivement soit de l'air, soit un gaz, la diminution ou l'augmentation de poids qu'on obtenait, ne provenaient que du gaz enlevé ou du gaz introduit, et qu'il n'était plus nécessaire de tenir compte des pertes de poids des ballons dans l'air puisqu'elles étaient égales. Pour éviter les corrections

relatives aux températures du gaz intérieur, Regnault fit en sorte que l'air et le gaz introduits fussent pesés à la température de la glace fondante. Il commençait par faire le vide à plusieurs reprises dans celui des ballons qui servait de récipient, en faisant toujours passer le gaz par des tubes à dessiccation. Le manomètre de la machine pneumatique donnait la pression intérieure du gaz qui restait lorsqu'il avait fait le vide. Le ballon, pendant cette opération, restait placé dans un vase en zinc rempli de glace fondante (fig. 59); puis il était essuyé, placé à l'un des plateaux de la balance; l'autre plateau sup-

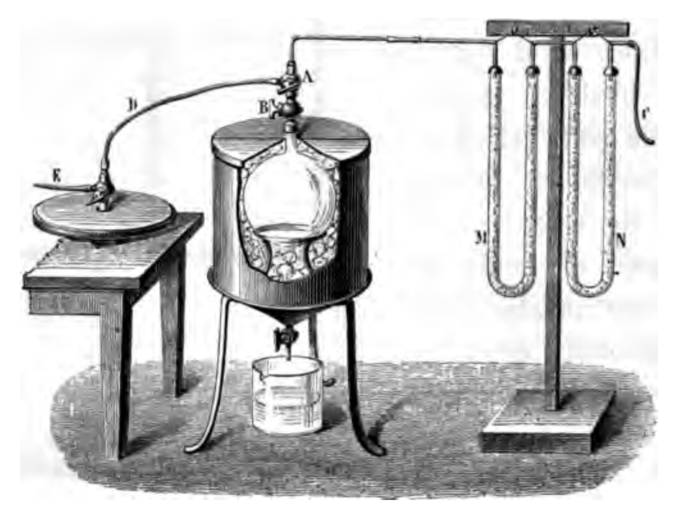


Fig. 59. — Densité des gaz. Méthode des ballons compensateurs de Regnault.

portant le second ballon, on établissait l'équilibre avec de la grenaille. Reportant alors le ballon dans la glace, et ouvrant le robinet, on laissait le gaz pénétrer jusqu'à ce que sa pression totale devînt égale à celle de l'atmosphère. Fermant le robinet et pesant le ballon, on avait le poids d'un volume de gaz à 0°, volume égal à la capacité du ballon à cette même température.

Enfin, une troisième opération semblable donnait le poids d'un pareil volume d'air sec à 0° et aussi à une pression totale qu'un manomètre à air libre, communiquant avec le ballon, permettait de mesurer.

On avait ainsi tous les éléments pour calculer la densité du gaz, en ramenant les poids à la pression commune de 760 millimètres[1].

Voici les densités de quelques gaz obtenues par ces procédés. Nous les faisons suivre du poids en grammes du litre de chacun d'eux, dans les mêmes conditions de pression et de température.

GAZ	DENSITÉS	POIDS DU LITRE EN GRAMMES	OBSERVATEURS
Air	1,0000	1,2932	»
Oxygène	1,1056	1,4298	Regnault.
Azote	0,9714	1,2561	Regnault.
Hydrogène	0,0693	0,08958	Regnault.
Acide carbonique	1,5290	1,9774	Regnault.
Ammoniaque	0,5967	0,7616	Biot et Arago.
Acide sulfhydrique	1,1912	1,5404	Gay-Lussac et Thenard.
Acide chlorhydrique	1,2472	1,5891	Biot et Arago.
Chlore	2,4700 [2]	3,1937	Gay-Lussac et Thenard.
Acide sulfureux	2,2474	2,8060	Gay-Lussac.
Cyanogène	1,8064	2,3302	Gay-Lussac.
Protoxyde d'azote	1,5275	1,9710	Thomson.

Les nombres de la troisième colonne du tableau sont déduits du poids, trouvé par Regnault, pour le litre d'air atmosphérique sec, à la température de la glace fondante et sous la pression de $0^m,760$. Ce poids est égal à $1^{gr},293187$, c'est-à-dire à la 773[e] partie de celui de l'eau distillée. Biot et Arago avaient trouvé $1^{gr},299$, valeur un peu plus forte. Comme l'intensité de la pesanteur varie selon l'altitude et la latitude du lieu, la pression de $0^m,760$ a une valeur pareillement variable. Aussi

1. Soit P le poids du gaz introduit dans le ballon, à la pression atmosphérique H, et h la pression du gaz intérieur qui restait après le vide fait, $H - h$ est la pression du gaz à 0° pour le volume du ballon. $P\frac{760}{H-h}$ est le poids du gaz ramené à la pression de 760 millimètres. Si P′ est le poids de l'air dans la seconde opération, H′ et h' les pressions de l'atmosphère et de l'air intérieur après le vide fait, en le ramenant à 760 millimètres, ce poids devient $P'\frac{760}{H'-h'}$. Le rapport de ces deux poids ou $\frac{P(H'-h')}{P'(H-h)}$ exprimera la densité cherchée.

2. A la température ordinaire.

le poids du litre d'air que nous venons de donner doit-il être rapporté à Paris à la hauteur de 60 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ce poids deviendrait $1^{gr},292743$ sous le parallèle de 45 degrés et au niveau de la mer, la pression étant toujours $0^{m},760$ et la température 0°.

Terminons ce paragraphe en rappelant qu'entre le procédé adopté par Biot et Arago, et celui que Regnault a si heureusement imaginé, une méthode très précise aussi avait été adoptée en 1860 par MM. Dumas et Boussingault pour obtenir les densités des gaz en évitant les causes d'erreur que nous avons signalées. Ces savants ont trouvé ainsi pour la densité de l'oxygène 1,1057, pour celle de l'azote 0,972 et pour celle de l'hydrogène 0,0693, nombres qui sont presque identiquement ceux que donna cinq ans plus tard la méthode perfectionnée de Regnault.

CHAPITRE VI

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS — FUSION ET SOLIDIFICATION

§ 1. LES TROIS ÉTATS. — TOUS LES CORPS SONT-ILS SUSCEPTIBLES DE PRENDRE L'ÉTAT SOLIDE, L'ÉTAT LIQUIDE ET L'ÉTAT GAZEUX?

L'action de la chaleur, telle que nous l'avons étudiée jusqu'ici, a paru employée tout entière à augmenter le volume des corps qui la subissent, c'est-à-dire à écarter leurs molécules constituantes. Dans les solides, ces molécules, retenues par la cohésion à des distances déterminées et dans des positions relatives fixes pour un degré donné de température, s'éloignent de plus en plus à mesure que l'action répulsive de la chaleur devient plus grande, jusqu'au moment où cette force devient prépondérante et où la cohésion est annulée. A ce moment, le corps prend un autre aspect, et de solide devient liquide. Si sa température continue alors à s'élever, la tendance des molécules à s'écarter les unes des autres est encore plus prononcée, jusqu'à ce qu'une nouvelle transformation s'opère et que de l'état liquide le corps passe à un troisième état, celui de gaz ou de vapeur. Alors toute cohésion a disparu entre les molécules du corps, qui, au lieu de conserver leurs positions et leurs distances respectives comme dans l'état solide, ou de rester en équilibre indifférent comme dans l'état liquide, se repoussent et tendent à l'expansibilité indéfinie si une pres-

sion extérieure suffisante ne s'y oppose[1]. Les mêmes phénomènes se présentent dans un ordre inverse quand, prenant d'abord un corps gazeux, tel que la vapeur d'eau, on diminue progressivement sa température et qu'on voit cette vapeur devenir liquide, puis passer à l'état solide.

Ainsi les changements de volume et les changements d'état déterminés par les variations de température forment une série continue de phénomènes qui ont la même cause. Nous avons décrit les premiers et exposé leurs lois. Le moment est venu d'étudier les autres.

Tous les corps sont-ils susceptibles de prendre les trois états?

L'expérience seule pouvait répondre à cette question. En se bornant à l'observation immédiate, il est d'abord aisé de constater qu'aux températures ordinaires, c'est-à-dire entre les extrêmes de froid et de chaleur dont chaque climat est susceptible, quelques corps seulement peuvent se présenter sous ces différents aspects : l'eau par exemple est solide en hiver pendant les grands froids, liquide aux températures moyennes, se vaporisant facilement d'ailleurs quand on la soumet à l'action d'un foyer calorifique. Quelques solides, ceux qu'on nomme des *corps gras*, se liquéfient à une température peu élevée; le beurre, le suif, la stéarine, sont dans ce cas. Aux températures ordinaires, un grand nombre de liquides émettent des vapeurs, ou passent, en partie au moins, à l'état gazeux;

1. « Si on chauffe de plus en plus un corps solide, dit Lavoisier, si on continue d'y introduire ou d'y accumuler de nouvelles quantités de calorique, ses molécules s'écartent de plus en plus les unes des autres, et enfin on arrive à un terme où ces molécules cessent d'être dans la sphère d'activité de leur attraction : c'est alors que le corps passe de l'état solide à l'état liquide. Non seulement les molécules du corps n'ont plus dans cet état aucune adhérence entre elles, non seulement elles n'exercent plus aucune attraction l'une sur l'autre, mais encore elles tendent à obéir à une force répulsive, qui sans doute leur est imprimée par le calorique; elles font effort pour s'écarter les unes des autres, et elles s'écarteraient en effet indéfiniment dans l'espace, si la pesanteur de l'atmosphère ne mettait obstacle à cet écartement. » (*Du passage des corps solides à l'état liquide par l'action du calorique.* Œuvres complètes de Lavoisier, t. II.) Depuis que ce passage est écrit, les idées des physiciens sur la nature de la chaleur se sont profondément modifiées, mais on conçoit toujours de même son mode d'action sur les molécules des corps.

presque tous se vaporisent complètement si on les soumet à un degré de chaleur convenable, d'ailleurs fort différent pour chacun d'eux.

La plupart des corps solides ne fondent qu'à une température élevée. Tels sont les métaux. Mais la différence est grande de l'un à l'autre; tandis que l'étain, le bismuth, le plomb se liquéfient à une température moindre que l'ébullition du mercure ou peu supérieure, l'or, le fer, le platine n'entrent en fusion que sous l'action des plus puissantes sources de chaleur. A l'autre extrémité de cette échelle, le mercure n'est solide au contraire qu'aux plus basses températures des régions boréales, ou aux froids artificiels produits par certains mélanges. Réduits à l'état liquide, quelques métaux émettent des vapeurs et par conséquent prennent l'état gazeux. Mais ce n'est que récemment que plusieurs d'entre eux, l'or, l'argent, le cuivre, ont pu être gazéifiés ou volatilisés : c'est la chaleur développée par l'arc voltaïque qui a permis d'obtenir ce résultat. Les minéraux, les roches les plus dures ont été fondus, grâce à l'emploi de ces foyers artificiels intenses, et il n'est plus guère de corps qu'on puisse appeler *réfractaires* ou *fixes*, en entendant par là, comme on le faisait autrefois, les solides capables de résister à l'action continue des températures les plus élevées sans se liquéfier ou sans se décomposer. Même parmi ces derniers il en est qu'on est parvenu à liquéfier, en exerçant sur eux une pression qui empêche le dégagement de ceux de leurs principes constituants que la chaleur rend gazeux avant la fusion. La craie, par exemple, qui est un carbonate de chaux comme le marbre, se décompose si on la soumet à l'action d'une forte chaleur : l'acide carbonique se sépare de la chaux sous forme gazeuse, et la chaux elle-même est un des rares solides qui ont jusqu'ici résisté à la fusion et qu'on peut qualifier, comme la magnésie et la strontiane, de réfractaires. Mais, grâce à un procédé imaginé par Hall en 1804, la craie a pu être fondue, ainsi que d'autres corps, tels que la corne, la houille. Ce physicien emplissait de craie un tube de fer très

résistant, qu'il fermait hermétiquement avant de le soumettre à l'action d'une chaleur intense. La haute pression qui se développait à l'intérieur du tube et qui provenait du gaz résultant d'un commencement de décomposition, s'opposait à la continuation de cette action, et le carbonate de chaux subissait la fusion. En laissant le tube refroidir lentement, l'expérimentateur trouvait à l'intérieur un cylindre solide de texture cristalline, ressemblant complètement au marbre saccharoïde.

Toutefois la plupart des solides d'origine organique, le bois, les autres substances végétales ou animales, se décomposent en leurs éléments sous l'action de la chaleur sans se liquéfier. Un de ces éléments, le carbone, est une des substances les plus réfractaires : on verra cependant qu'il a donné des indices de fusion. Quant aux autres éléments, ce sont en général des substances volatiles, des gaz, et l'on sait aujourd'hui que tous les gaz ont pu être, sous de certaines conditions de température et de pression, réduits à l'état liquide. Il n'y a plus, comme on pouvait le dire encore il y a quelques années, de *gaz permanents*.

Tout fait donc présumer qu'il n'est pas, dans la nature, de substance qui, dans des conditions convenables de température et de pression, ne puisse affecter successivement l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. En étudiant les conditions de ces transformations, nous allons voir que la chaleur est toujours l'agent qui joue le principal rôle.

§ 2. FUSION DES CORPS SOLIDES. — FUSION BRUSQUE ET FUSION VITRÉE. LOIS DE LA FUSION.

On peut ranger en deux catégories principales les solides qui passent à l'état liquide sous l'influence de la chaleur. Les uns, comme le verre, les résines, la cire, la plupart des corps gras, éprouvent, à mesure que la température augmente, un ramollissement graduel qui leur donne d'abord une consistance pâ-

teuse; on nomme *fusion vitrée* ce mode de fusion, parce que c'est dans le verre qu'il est le plus caractérisé. D'autres solides, comme la glace, les corps métalliques, passent brusquement à l'état liquide. Il résulte de cette distinction que l'observation de la température à laquelle se produit la fusion vitrée est incertaine; pendant toute la période du ramollissement, cette température continue à s'élever, et ce n'est que lorsque la liquidité a atteint son maximum, qu'on peut noter le point où elle est parvenue. Il est probable toutefois qu'à chaque degré de consistance de la matière en expérience correspond aussi un degré fixe de température. Il n'en est plus ainsi pour les solides à fusion brusque. Le phénomène est alors caractérisé par deux lois très précises, dont nous avons déjà dit un mot en parlant de la fusion de la glace. Ces deux lois peuvent s'énoncer ainsi : chaque substance fond à une *température invariable* qui se reproduit identiquement dans toutes les expériences; cette température *reste fixe pendant toute la durée de la fusion*, quelle que soit l'intensité de la chaleur employée à l'opération. La rapidité de la fusion peut être hâtée par la quantité de chaleur fournie; mais tant qu'il reste une parcelle solide, la température ne s'élève pas au delà du point fixe : le thermomètre plongé dans le bain liquide reste stationnaire.

Nous verrons aussi que, pour fondre un poids donné d'une substance, la quantité de chaleur absorbée reste toujours la même, ou, ce qui revient au même, que la chaleur employée à la fusion d'une masse déterminée d'un corps est proportionnelle à cette masse; d'ailleurs elle varie d'une substance à l'autre. Mais, comme cette chaleur ne sert pas à élever la température, étant absorbée tout entière par le travail de la fusion, qu'ainsi elle ne se manifeste pas extérieurement, on l'a nommée *chaleur latente de liquidité* ou *de fusion*, par opposition à la chaleur sensible au thermomètre. Nous verrons plus tard quel sens il faut donner à cette expression, quand nous parlerons du travail mécanique de la chaleur.

Les lois si simples que nous venons d'énoncer, n'ont été bien constatées que vers la seconde moitié du dix-huitième siècle. On croyait encore alors que le point de fusion était variable, que la glace, par exemple, fond à des températures différentes, suivant l'altitude, ou suivant la latitude du lieu de l'expérience. C'est à un physicien écossais, Black, qu'est due la découverte, en 1762, de la constance de la température pendant la fusion et surtout la distinction entre la chaleur latente qu'il essaya de mesurer et la chaleur sensible.

On peut mesurer de deux manières la température de fusion d'un solide, soit en l'observant directement quand le corps est soumis à l'action de la chaleur, soit en faisant fondre d'abord celui-ci, puis attendant le moment où a lieu la solidification. Voici, d'après Buignet, comment on procède à la mesure directe : « On prend un petit tube à gaz et on l'effile en pointe fermée à son extrémité. On prend d'autre part un thermomètre très sensible, marquant les dixièmes de degré ; puis les deux pièces sont engagées dans un même bouchon que l'on adapte au col d'un grand ballon rempli d'eau. Un bec de gaz permet de chauffer ce ballon, et d'élever la température d'une manière lente et insensible. Ces dispositions étant prises, on introduit dans le tube une petite quantité de la matière solide dont on veut prendre le point de fusion. Elle tombe à la partie inférieure, sans pénétrer toutefois dans la partie conique effilée. L'eau du ballon étant amenée d'abord à une température inférieure de quelques degrés au point présumé de la fusion, et le système du tube et du thermomètre étant plongé dans cette espèce de bain-marie, on élève très lentement la température en surveillant avec soin la partie conique du tube. Aussitôt que la substance commence à fondre, on en est immédiatement averti par l'apparence particulière qu'elle prend en s'étalant sur la paroi courbe du verre. On note alors le degré indiqué par le thermomètre : ce degré exprime le point de fusion de la matière essayée. »

Le tableau ci-dessous donne les points de fusion d'un cer-

tain nombre de corps solides, simples ou composés, rangés dans l'ordre des températures décroissantes de ces points.

TEMPÉRATURES DE FUSION OU DE SOLIDIFICATION DE DIVERSES SUBSTANCES.

NOMS DES SUBSTANCES	TEMPÉRATURES DE FUSION	NOMS DES SUBSTANCES	TEMPÉRATURES DE FUSION
Iridium. . . . . . au-dessus de	1950°	Succin.	288°
Platine.	1700	Bismuth	265
Palladium	1700	Chlorure de zinc	250
Fer martelé anglais.	1600	Étain.	235
Fer doux français.	1500	Sélénium.	217
Acier, le moins fusible.	1400	Arsenic.	210
Acier, le plus fusible.	1300	Nitrate d'argent	198
Or.	1250	Camphre de Bornéo.	195
Fonte grise. . . . . . 1100 à	1200	Camphre du Japon.	175
Fonte blanche. . . . . 1030 à	1100	Sucre de canne.	160
Or au titre de la monnaie. . . .	1080	Colophane	135
Cuivre	1050	Soufre.	115
Cuivre jaune.	1015	Iode	107
Argent.	1000	Sucre de raisin.	100
Bronze.	900	Ambre gris.	100
Aluminium.	600	Alliage Darcet (5 plomb, 3 étain, 8 bismuth).	94
Tellure.	525	Sodium.	90
Cadmium, ...	500	Naphtaline.	78
Zinc.	450	Cire jaune	76
Iodure d'argent	450	Cire blanche.	69
Antimoine	440	Stéarine	61
Bromure d'argent.	380	Spermaceti.	49
Chlorure d'argent.	350	Potassium	55
Plomb.	335	Phosphore.	44
Chlorate de potasse.	334	Paraffine.	44
Alliages divers.		Suif.	33
— 3 équiv. plomb 1 étain	289	Beurre.	30
— 1 — — 1 —	241	Eau	0
— 1 — — 2 —	196	Brome.	— 7,5
— 1 — — 3 —	186	Éthers divers. . au-dessous de	— 32
— 1 — — 4 —	189	Mercure	— 39,5
— 1 — — 5 —	194	Ammoniaque anhydre.	— 80
— 2 — — 9 — 1 zinc.	168	Alcool absolu. . au-dessous de	— 90

On voit combien sont différentes les températures nécessaires pour fondre les substances contenues dans ce tableau, même lorsqu'elles appartiennent, comme le platine et le mercure par exemple, à la même famille de corps simples, à celle des métaux : pour ces deux corps l'écart n'est pas moindre de

1800 degrés; le brome devient liquide à 7°,5 au-dessous de la glace, tandis que l'iode exige une température supérieure à celle de l'eau bouillante. On remarquera que certains composés, tels que l'iodure d'argent, le bromure d'argent ont un point de fusion intermédiaire entre ceux des corps simples constituants (ce qui s'explique aisément), tandis que plusieurs des alliages de plomb et d'étain, de plomb, d'étain et de bismuth fondent au contraire à des températures inférieures à celles des métaux dont ils sont formés ; c'est cette propriété qui permet d'obtenir des alliages fusibles comme l'alliage si connu de Darcet, dont le point de fusion est de 94° seulement. Heintz a montré aussi qu'un mélange d'acides gras fond à une température beaucoup plus basse que celle des acides eux-mêmes. Par exemple, les acides myristique, palmitique et laurique fondent, le premier à 53°,8, le second à 62° et le troisième à 43°,6, tandis qu'un mélange de 3 parties d'acide myristique, de 7 parties d'acide palmitique et de 2 parties d'acide laurique, a son point de fusion à 32°,7.

Quant aux corps qui, pour passer à l'état liquide, commencent par se ramollir, prennent une consistance pâteuse et insensiblement arrivent à la fusion complète, on comprend qu'il est difficile d'assigner avec quelque précision la température à laquelle cette fusion est obtenue. Pour certains d'entre eux notamment, tels que le verre, dont la composition est assez complète, la fusibilité est une propriété qui varie avec cette composition, c'est-à-dire à la fois avec la nature des corps qui y entrent, et avec leur proportion. Les verres incolores qui servent à fabriquer la gobeleterie, les vitres, les glaces, sont des silicates doubles de chaux et de potasse ou de soude; le verre à bouteilles renferme de l'oxyde de fer et du peroxyde de manganèse; le cristal est un silicate double de potasse et d'oxyde de plomb; les verres destinés à l'optique, et qu'on nomme crown-glass ou flint-glass selon leur composition, contiennent en outre du carbonate de potasse, de l'acide arsénieux, du minium, etc. Or, de tous ces corps, les uns, comme les silicates

de potasse et de soude, sont très fusibles; d'autres, tels que les silicates de chaux, ne fondent qu'à une température élevée, celle des plus violents feux de forge, ou même se ramollissent seulement; les silicates de fer, de manganèse et de plomb sont beaucoup plus fusibles et cèdent aux températures des fourneaux de laboratoire. On rencontre donc là ce que nous venons de constater pour la température de fusion des alliages : à savoir, que les silicates multiples fondent généralement à une température inférieure à celles des silicates constituants, fait heureux pour l'industrie de la verrerie et pour les multiples opérations qu'elle effectue en vue des usages variés de ses produits.

§ 3. SOLIDIFICATION DES CORPS LIQUIDES. — CONGÉLATION.

La *solidification* des liquides est le phénomène inverse de la fusion des solides; il est régi par les mêmes lois. La température à laquelle se fait ce changement d'état est fixe pour chaque corps et elle est précisément celle du point de fusion. Par exemple, quand une masse de glace est à la température de zéro, toute addition de chaleur détermine la fusion d'une partie de cette masse; de même que s'il s'agit d'une masse d'eau à la même température de zéro, toute soustraction de chaleur détermine la solidification ou congélation d'une partie du liquide. S'il s'agit de substances qui ne passent point brusquement à l'état liquide, qui prennent d'abord une consistance pâteuse quand on les échauffe graduellement, elles présentent les phénomènes inverses en passant de l'état liquide à l'état solide, commençant par s'épaissir à mesure qu'elles se refroidissent, et n'atteignant leur solidification complète qu'au point où elles avaient commencé à se ramollir.

La seconde loi que nous avons vue présider à la fusion, est également vraie pour la solidification des liquides. Tant que toute la masse du corps en train de se solidifier n'a pas subi le changement d'état, sa température reste invariable, quelque

intense que soit la cause de refroidissement à laquelle ce corps est soumis. Toute la chaleur qui avait été absorbée dans le passage du corps à l'état liquide, et que nous avons appelée *chaleur latente de liquidité*, redevient libre quand le passage inverse se fait, et sert à maintenir fixe la température de la masse non encore solidifiée.

Un certain nombre de liquides n'ont pu encore être congelés. Tel est l'alcool absolu : c'est ce qu'exprime notre tableau, où l'on voit que la température de fusion de ce corps est inférieure à —90°. Toutefois Despretz, en soumettant l'alcool au froid d'un mélange réfrigérant d'acide carbonique solide, d'éther et de protoxyde d'azote liquide, l'a réduit à une consistance pâteuse assez prononcée pour qu'on pût renverser le vase qui le contenait sans qu'il s'écoulât[1]. C'est aussi au moyen d'un mélange réfrigérant que Braun a pu, en 1759, congeler le mercure, inconnu auparavant à l'état solide. Ces expériences furent répétées en 1795 à l'École polytechnique; Thilorier employa dans ce but un mélange d'acide carbonique solide et d'éther. La congélation du mercure, sous la seule influence des froids atmosphériques[2], a été obtenue pour la première fois pendant l'expédition de Parry dans les régions polaires boréales. En se solidifiant, le mercure cristallise en octaèdres; il présente la malléabilité et la ténacité du plomb, de sorte qu'on a pu l'aplatir sous le marteau et en frapper des médailles au balancier.

§ 4. CHANGEMENTS DE VOLUME DUS A LA FUSION OU A LA SOLIDIFICATION. FORCE EXPANSIVE DE LA GLACE.

La fusion des corps solides et le phénomène inverse de la solidification des liquides sont caractérisés l'un et l'autre par

1. L'alcool absolu vient d'être solidifié par M. Wrobleski (avril 1883).
2. MM. Barral et Bixio, dans leur célèbre ascension aérostatique de 1850, ont atteint dans les hautes régions de l'air une couche dont la température était celle de la congélation du mercure.

les deux mêmes lois de la fixité du point auquel s'effectuent ces deux changements d'état, ou de l'invariabilité de la température pendant toute la durée de l'un ou de l'autre phénomène. Mais si la température de la fusion et celle de la solidification sont identiques et restent fixes et invariables pour une même substance, il n'en est pas de même du volume, qui subit un brusque changement dans ce passage d'un état physique à un autre. En général, c'est une dilatation qui résulte de la fusion d'un corps solide, de sorte que le liquide qui en provient a une moindre densité que lui. Un petit nombre de substances font exception toutefois à cette règle; ce sont la glace, la fonte de fer, le bismuth, l'argent, l'antimoine, l'acide sulfurique bihydraté, et l'alliage formé de 1 partie de plomb, 1 d'étain et 4 de bismuth. Tous ces corps, en se liquéfiant, se contractent, et sont plus denses à l'état liquide qu'à l'état solide. C'est à cette propriété que l'on doit la perfection du moulage de la fonte : coulée liquide dans les moules creux des objets à reproduire, elle se dilate en se refroidissant et en se solidifiant, et la pression qui en résulte contre les parois des moules oblige le métal à en épouser avec fidélité la forme dans ses moindres détails.

La dilatation de l'eau qui se congèle est un fait d'observation que tout le monde peut constater; on voit en effet les glaçons flotter pendant l'hiver sur l'eau des rivières et des lacs. Tous les ans, au retour du printemps, des blocs de glace détachés des banquises et des glaciers des régions polaires vont, entraînés par les courants, se fondre dans les eaux plus chaudes des latitudes moins élevées : il est vrai que l'eau de mer est plus dense que l'eau pure dont les icebergs ont été formés par la congélation. Galilée avait déjà fait observer que la glace était moins dense que l'eau sur laquelle elle surnage, et les académiciens de Florence avaient vérifié par une expérience classique le fait de la dilatation de l'eau qui se congèle : ayant rempli d'eau une sphère de cuivre qu'ils exposèrent à un froid intense, elle se brisa, bien que l'épaisseur du métal

fût de deux tiers de pouce. En 1667, Huygens fit éclater, en deux endroits, un tube de fer d'un doigt d'épaisseur empli d'eau et hermétiquement fermé : la rupture eut lieu après douze heures d'exposition à la gelée. Voici comment Pouillet répétait, dans son cours, cette expérience d'Huygens : « Je prends pour cela, dit-il, des tubes de fer très épais, de 1 mètre

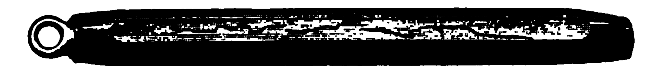


Fig. 60. — Force expansive de l'eau congelée. Expérience de Huygens.

de longueur, de 3 centimètres de diamètre intérieur, fermés à vis aux deux bouts. Après les avoir remplis d'eau, on les dispose dans une caisse de bois peu profonde, on les couvre d'un mélange réfrigérant de sel et de glace pilée; bientôt l'explosion se fait entendre, les tubes qui résisteraient à plusieurs centaines d'atmosphères sont déchirés dans leur longueur (fig. 60).

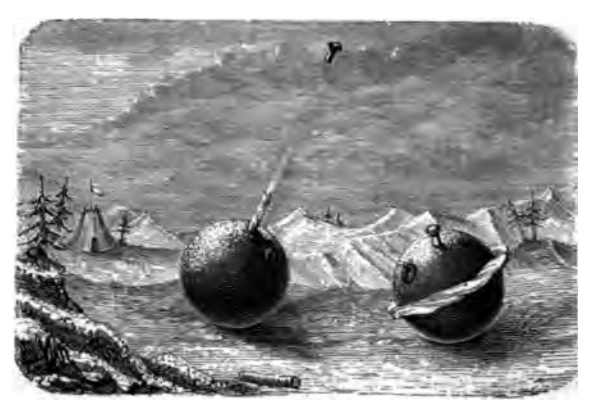


Fig. 61. — Expériences sur la force expansive de la glace du major Edward Williams.

On peut même faire sortir les cylindres de glace et montrer que l'eau n'a été qu'en partie congelée pour produire une si forte pression. » On connaît aussi les célèbres expériences faites à Québec en 1784 et en janvier 1785 par le major d'artillerie Edward Williams. Ayant rempli d'eau des bombes de 13 pouces de diamètre, il les exposa à la basse température de l'air. Un bouchon en fer, fortement enfoncé dans le trou de fusée de ces

bombes, fut projeté à une distance considérable, dans sept expériences successives; un cylindre de glace de plusieurs pouces de longueur sortit chaque fois du trou, immédiatement après l'explosion. Dans une huitième expérience, la température extérieure s'étant abaissée à 24 degrés au-dessous de zéro, la bombe éclata, se fendit et l'on vit une lame de glace en forme de nageoire de poisson faire saillie entre les deux fragments.

MM. Ch. Martins et Chancel ont répété, en 1870, les expériences du major Williams, et ont calculé la force qui faisait éclater les projectiles. Ils opérèrent d'abord avec une bombe de 22 centimètres de diamètre extérieur, épaisse de 26 millimètres, qu'ils remplirent d'eau à $+4^\circ$ et qu'ils fermèrent à l'aide d'une vis et d'une rondelle de plomb interposée entre la courbure de la bombe et le rebord de la vis. Puis ils la plongèrent dans un mélange réfrigérant à -21°. « Au bout d'une heure et demie, disent-ils, le projectile éclata suivant un grand cercle passant par l'orifice, et se sépara en deux fragments. La couche de glace était régulière et d'une épaisseur de 10 millimètres. Le volume de la glace s'élevait à 814 centimètres cubes; mais ce volume de glace correspond à un volume d'eau moindre de $\frac{1}{11}$ ou de 74 centimètres cubes. Or, l'eau se comprimant de 50 millionièmes par atmosphère, nous trouvons que la force qui a fait éclater la bombe était de 550 atmosphères, en supposant la glace compressible comme l'eau[1]. »

D'autres expériences faites sur des projectiles creux plus petits que les bombes ont donné aux mêmes observateurs des pressions de 440 et de 574 atmosphères. Ils purent aussi, à l'aide d'une disposition ingénieuse, placer au centre des bombes un réservoir de thermomètre dont la tige graduée put être observée de loin au dehors à l'aide de lunettes, et constater ainsi que l'eau intérieure s'était abaissée, une première fois, de $10^\circ,7$ à $-2^\circ,8$ et une seconde fois de $8^\circ,4$ à $-4^\circ,2$; c'est là une vérification du fait que la pression abaisse le point de

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1870, t. I, p. 1150.

congélation de l'eau. Nous reviendrons incessamment sur ce dernier phénomène.

On constaterait de la même manière la force expansive des autres liquides qui se dilatent en se solidifiant. Tyndall a fait une expérience analogue avec du bismuth : « Vous voyez, disait-il dans une de ses leçons sur la Chaleur, cette bouteille de fer, crevée du goulot jusqu'au fond; je la brise avec ce marteau, et elle vous apparaît remplie à l'intérieur par un noyau métallique. Ce métal est du bismuth; je l'ai versé dans la bouteille lorsqu'il était fondu, et j'ai bouché la bouteille avec une vis. Le métal s'est refroidi, il s'est solidifié, il s'est dilaté, et la force d'expansion a suffi pour faire éclater la bouteille. »

Chacun de nous a pu être témoin de faits qui prouvent l'intensité de la force expansive de la glace; elle brise les vases remplis d'eau, les tuyaux de plomb ou de fonte des eaux ménagères, lorsqu'on commet l'imprudence d'y verser de l'eau par les fortes gelées. L'hiver, quand le sol, gonflé d'humidité, vient à geler brusquement et fortement, la dilatation qui en résulte cause maints dégâts. Les pavés sont soulevés, des murs sont ébranlés. Les pierres, que l'on nomme pour cette raison *gélives*, parce qu'elles retiennent de l'eau qui se solidifie dans les froids, se désagrègent, se fendent. Enfin la sève, en se congelant dans les hivers très rigoureux, fait éclater les arbres.

Nous avons vu dans nos premiers chapitres que, à l'exception d'un corps, l'iodure d'argent (qui se contracte quand sa température augmente, et cela à un point éloigné de sa fusion), tous les autres corps solides ou liquides se dilatent sous l'influence de la chaleur. Seulement la dilatation du corps sous sa forme liquide suit le plus souvent une autre loi que celle qu'il éprouve sous la forme solide. Enfin on vient de voir que, dans le passage de l'un à l'autre état, certaines substances, telles que l'eau, le bismuth, subissent une contraction plus ou moins brusque; tous les autres éprouvent au contraire une dilatation. Mais chez tous le voisinage du point de fusion ou de solidification est le siège d'une perturbation, qui tient probablement

au nouvel arrangement moléculaire nécessité par le changement d'état. Les variations du volume, de part et d'autre du point de fusion, ont été étudiées pour trois corps par un physicien allemand, M. Ermann ; on peut aisément faire comprendre à l'aide d'une représentation graphique comment se comportent les corps en question, qui sont l'eau, le phosphore et l'alliage fusible dont nous avons donné les proportions (p. 165). En comptant les températures sur l'axe XX', et en figurant le volume du corps par une ordonnée ou droite perpendiculaire à l'axe, les variations de volume se trouvent représentées par une courbe qu'on obtient en joignant par une ligne continue

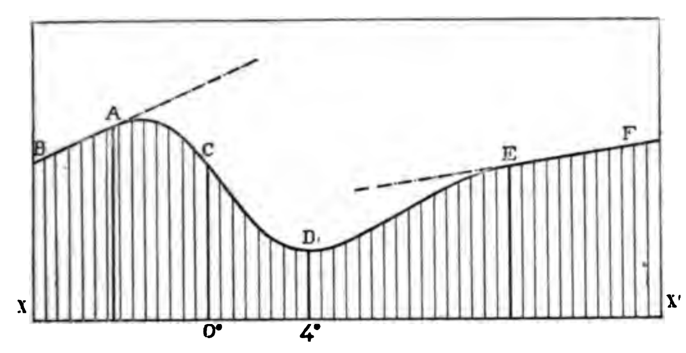


Fig. 62. — Courbe de dilatation de l'eau.

les sommets de toutes les ordonnées : tant que la courbe s'éloigne de l'axe, il y a dilatation ; c'est au contraire une contraction si la courbe se rapproche de l'axe. Les figures 62, 63 et 64 donnent trois exemples de la loi de variation dans le voisinage des points de fusion, pour l'eau, le phosphore et l'alliage. Elles montrent que, un peu avant l'approche de ce point, la dilatation est représentée par une ligne droite inclinée à l'axe ; qu'il en est de même de la dilatation du corps à une certaine distance du point critique. Mais pour l'eau l'inclinaison de la seconde ligne EF est moindre que celle de la première BA : c'est la traduction du fait connu que la glace a un coefficient de dilatation plus grand que l'eau. Le contraire a lieu pour le phosphore. Pour l'alliage fusible, les deux lignes sont sur le

prolongement l'une de l'autre, d'où l'on voit que la dilatation de l'alliage liquide est la même que celle de l'alliage solide.

Quant à ce qui se passe dans le voisinage du point de fusion,

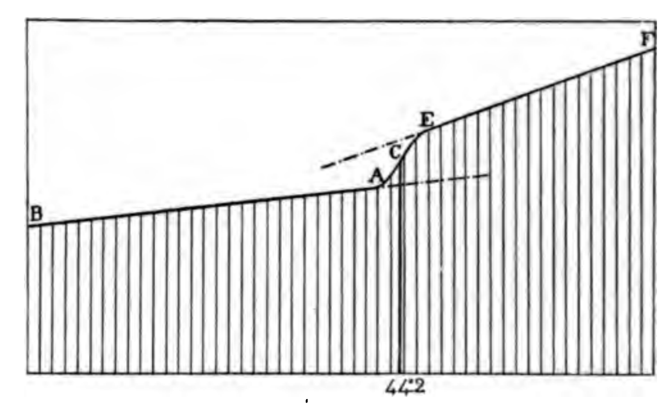


Fig. 63. — Courbe de dilatation du phosphore.

les courbes des figures permettent de s'en faire une idée très nette. La glace, prise au-dessous de 0°, commence par se dilater

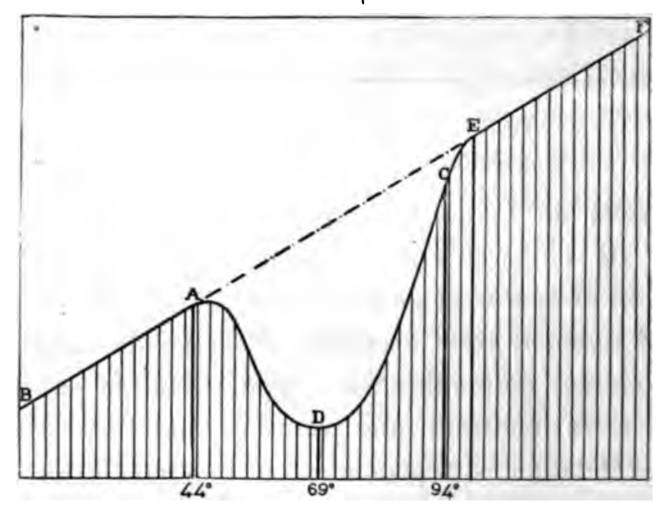


Fig. 64. — Courbe de dilatation de l'alliage fusible Ermann.

rapidement quand on l'échauffe ; un peu avant d'atteindre le point de fusion, elle se contracte, et cette contraction continue, quand l'eau est devenue liquide, jusqu'à +4°, qui est le maximum de densité ; puis, à partir de ce point, la dilatation

recommence, croît assez rapidement d'abord, et finit par reprendre une marche régulière, mais moins rapide que celle de la glace pour des accroissements égaux de température. Pour le phosphore, deux lignes droites BA et EF figurent la dilatation à l'état solide et la dilatation à l'état liquide. Sa marche, vers le point de fusion, n'a pu être déterminée. Enfin, pour l'alliage fusible, on voit qu'une courbe analogue à celle de l'eau raccorde les deux lignes droites entre les températures de 43°,7 et de 100° : il y a rapide contraction depuis 43°,7 jusqu'à 68°,7; le volume se dilate de ce point jusqu'à 94°, température de la fusion, et ensuite jusqu'à 100°. A ce point la dilatation reprend la même valeur qu'à l'état solide.

Les causes de ces variations singulières sont inconnues; mais on s'accorde à les attribuer aux changements de structure moléculaire qui précèdent et accompagnent le changement d'état. Dans trois corps simples, trois métalloïdes, le soufre, le sélénium, le phosphore, les particularités relatives à ces modifications de structure sont si remarquables, que nous ne pouvons nous dispenser de les décrire avec quelques détails.

§ 5. ÉTATS ALLOTROPIQUES DU SOUFRE, DU SÉLÉNIUM ET DU PHOSPHORE.

Le point de fusion du soufre est 115°, comme on peut le voir dans notre précédent tableau. Si l'on échauffe peu à peu du soufre solide dans un matras jusqu'à cette température, on le verra devenir liquide (fig. 65) en conservant sa couleur jaune, et sa fluidité sera alors comparable à celle d'une huile grasse. En projetant dans l'eau froide une portion du soufre liquide à cette température de fusion, ou à une température un peu supérieure, il se solidifiera en fragments globulaires, très friables, reprenant l'aspect ordinaire du soufre jaune. Mais si l'on continue de chauffer le matras, on verra, vers 150°, le liquide, dont la couleur est devenue jaune foncé, s'épaissir; la viscosité ira en croissant avec la température et sa couleur passera

du rouge au rouge brun. Vers 230°, cette consistance pâteuse atteint son maximum, et l'on peut renverser le vase qui le contient, sans qu'une goutte s'en échappe. Refroidi alors brusquement dans l'eau, il reste mou et transparent. Le *soufre mou* (c'est le nom qu'on lui donne alors), chauffé au-dessus de 230°, devient peu à peu moins visqueux, en conservant sa même couleur brun-rougeâtre ; à 330° ou 340°, il est redevenu beaucoup plus liquide, comme s'il avait subi une seconde fusion.

Le sélénium, dont nous avons eu l'occasion d'indiquer les propriétés électriques en décrivant le photophone[1], se présente, comme le soufre, sous des états physiques différents : on en compte jusqu'à quatre : le sélénium *noir*, le sélénium *rouge cristallisé*, le sélénium *rouge amorphe* ou *vitreux*, insoluble dans le sulfure de carbone, et enfin le sélénium *rouge amorphe et soluble* dans le sulfure de carbone. En chauffant le sélénium vitreux au-dessus de 100°, il devient pâteux et semblable à de la cire à cacheter en fusion. Il est alors, selon Mitscherlich, identique avec le sélénium noir, dont nous avons vu que le point de fusion est 217°, et que, dans son état pâteux, on peut étirer en fils qui sont d'un rouge rubis par transparence.



Fig. 65. — Fusion du soufre.

Le phosphore ordinaire, nous l'avons vu, a son point de fusion à 44° environ. Chauffé à 70° et refroidi brusquement, il se transforme en une masse opaque noire qui, par une fusion nouvelle et un lent refroidissement, reproduit le phosphore ordinaire. Le phosphore *noir* est plus mou que l'autre. Mais la forme la plus intéressante de ce métalloïde est celle qui est connue sous le nom de phosphore *rouge* ou *amorphe*. Schrætter a montré qu'il se forme sous l'action prolongée d'une tempéra-

1. Voir le tome III du MONDE PHYSIQUE, chap. VIII de la 2e partie.

ture de 250° sur le phosphore ordinaire. La substance obtenue par ce procédé forme des masses compactes, ayant l'aspect de l'hématite, à cassure conchoïde et brillante, ou bien une poudre rouge-carmin. Au-dessus de 250°, le phosphore rouge fond, et à 260° il se transforme à nouveau en phosphore ordinaire. Les propriétés de ces deux états singuliers d'une même substance sont si différentes, qu'on dirait deux corps simples distincts. Couleur, structure moléculaire, densité, chaleur spécifique, solubilité, odeur, inflammabilité, altérabilité à l'air, action sur les organes, tout diffère de l'un à l'autre. En voici le tableau, d'après M. Cahours :

PHOSPHORE ORDINAIRE.	PHOSPHORE ROUGE.
Incolore.	Rouge écarlate.
Cristallisable.	Amorphe.
Densité variant entre 1,82 et 1,84.	Densité sensiblement égale à 2.
Chaleur spécifique = 0,1887.	Chaleur spécifique = 0,1668.
Très soluble dans le sulfure de carbone, soluble dans les huiles grasses et volatiles.	Insoluble dans le sulfure de carbone, les huiles essentielles et les huiles grasses.
Immédiatement altérable à l'air et phosphorescent.	A peine altérable à l'air et non phosphorescent.
Inflammable vers 60°.	Inflammable au-dessus de 250°.
Bout à 290°.	Chauffé vers 260° dans le vide ou dans un gaz inerte, repasse à l'état de phosphore ordinaire.
Se combine avec le soufre vers la température de fusion de ce corps, avec explosion.	Se combine avec le soufre à + 230°.
Odeur particulière et caractéristique.	Inodore.
Très délétère.	Non délétère.

On a donné le nom d'*allotropie* au phénomène de transformation que subissent les corps dont nous venons de parler, admettant ainsi que, sous l'influence de la chaleur, leurs molécules ou mieux leurs atomes constituants se groupent d'une façon tout à fait différente à certains degrés de température.

CHAPITRE VII

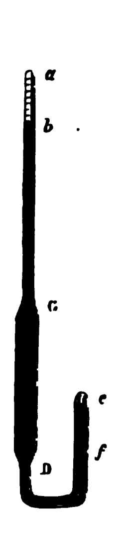
CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS — SURFUSION DISSOLUTION — SURSATURATION

§ 1. INFLUENCES DIVERSES SUR LES TEMPÉRATURES DE FUSION DES SOLIDES.

On a vu que les solides susceptibles de passer brusquement à l'état liquide sous l'action de la chaleur ont un point de fusion fixe, et tellement différent d'un corps à l'autre, qu'il peut servir à caractériser chaque espèce de substance. Cette température fixe de fusion est aussi généralement celle du retour à l'état solide, de la *solidification* ou *congélation*.

Cependant ce n'est pas là une loi absolue, et le point de fusion ou de solidification peut varier sous l'influence de circonstances exceptionnelles. La pression extérieure est une de ces causes de variation, mais il faut qu'elle ait une intensité considérable pour amener un changement sensible, bien qu'assez faible, dans les températures de fusion. Pour les corps qui se dilatent en passant de l'état solide à l'état liquide, c'est-à-dire dont les molécules s'écartent par le fait du changement d'état, une augmentation de pression est un obstacle qui contrarie l'action de la chaleur : la température de fusion de ces corps doit donc, sous cette influence, être plus élevée. Le contraire doit avoir lieu s'il s'agit de corps qui, comme la glace, se contractent en se liquéfiant. Des expériences dues à Bunsen et à W. Thomson ont confirmé ces prévisions toutes théoriques.

Le premier de ces physiciens employait un tube doublement recourbé, fermé à ses deux extrémités, rempli de mercure de *b* en *f*. L'espace *ef* était occupé par la substance à étudier, du spermaceti ou blanc de baleine, par exemple. L'espace *ab* contenait de l'air. En chauffant dans un bain la partie inférieure de cet appareil, la dilatation du mercure comprimait l'air et cette augmentation de pression intérieure réagissait sur le blanc de baleine. On notait, au moment où ce dernier entrait en fusion, la pression du manomètre *ab* et



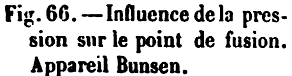


Fig. 66. — Influence de la pression sur le point de fusion. Appareil Bunsen.

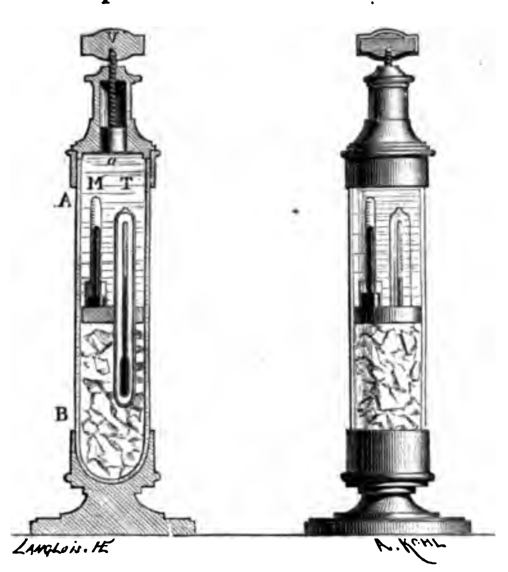


Fig. 67. — Appareil de W. Thomson pour mesurer l'influence de la pression sur le point de fusion de la glace.

la température du bain. Bunsen trouva ainsi que le point de fusion du blanc de baleine, qui est de 47°,7 sous la pression de 1 atmosphère, atteint 49°,7 quand la pression est de 96 atmosphères, et 50°,9 pour une pression de 156 atmosphères : l'élévation est à peu près proportionnelle à l'accroissement de pression. Trois expériences sur la paraffine ont donné à Bunsen, pour 1 atmosphère 46°,3; pour 85 atmosphères, 48°,9; pour 100 atmosphères, 49°,9; ici la proportionnalité n'existe plus.

La figure 67 montre la disposition imaginée par W. Thomson

pour constater l'influence de la pression sur la fusion de la glace. Un cylindre en verre, fermé en haut et en bas par des viroles de cuivre AB, renferme des fragments de glace qu'un disque de plomb maintient dans la moitié inférieure, et de l'eau distillée jusqu'au sommet. Le couvercle supérieur donne passage à un bouchon ou piston métallique *a* qu'on peut presser à volonté à l'aide d'une clef à vis V. La pression exercée se mesure à l'aide d'un manomètre à air comprimé M, et la température par un thermomètre T dont le réservoir et la tige sont protégés contre la pression par une enveloppe résistante de verre. Comme le cylindre renferme toujours en même temps de la glace et de l'eau en contact, le thermomètre est regardé comme indiquant la température de la fusion à tous les instants de l'expérience. Voici quelques nombres obtenus par l'expérimentateur :

1	atmosphère.	0°,000
8	—	— 0°,049
16,8	—	— 0°,129

Ainsi la température de fusion de la glace s'abaisse à mesure que la pression augmente.

On constate d'ailleurs le fait, sans aucune mesure, grâce à une expérience ingénieuse due à Mousson. La figure 68 représente un tube d'acier très épais et très résistant, fermé à sa partie inférieure par un bouchon à vis, à sa partie supérieure par une vis d'acier de plus grande longueur, dont la tête porte un levier à l'aide duquel on peut la tourner et exercer une pression. On emplit le tube d'eau et, avant de le refermer, on y introduit un fragment de métal. En retournant le tube de sorte que le bouchon occupe la partie supérieure, le morceau de métal tombera au fond du tube, reposant par conséquent sur la pointe de la longue vis d'acier. Dans cet état, on entoure l'appareil d'un mélange réfrigérant qui congèle l'eau intérieure. Quand l'eau est solidifiée, en retournant l'appareil dans la position de la figure, il est clair que le morceau de

métal est alors maintenu par la glace au contact de la pointe de la vis. C'est alors qu'en manœuvrant le levier on exerce une pression sur le cylindre de glace, et cette pression peut s'élever à plusieurs milliers d'atmosphères. Cela fait, si l'on débouche le cylindre, on trouve le métal en contact avec le bouchon, comme s'il eût traversé la glace. Pour expliquer ce changement de position, on est obligé d'admettre que la pression a fait fondre la glace et permis au métal de traverser l'eau de fusion ; puis que, la pression cessant, celle-ci a repris comme auparavant l'état solide sous l'influence de la basse température du milieu où l'appareil était plongé.



Fig. 68. — Expérience de Mousson sur l'abaissement du point de fusion de la glace.

Citons encore à l'appui du même fait les expériences intéressantes dues à M. Boussingault et effectuées pendant l'hiver de 1870-1871 à l'aide d'un canon d'acier, fondu et forgé, de 46 centimètres de longueur, de 13 millimètres de diamètre intérieur et de 8 millimètres d'épaisseur. Ce cylindre était foré jusqu'à une profondeur de 24 centimètres ; la partie pleine avait une forme hexagonale qui permettait de la saisir dans la mâchoire d'un étau. Le haut du canon, à partir de l'ouverture, portait un pas de vis sur lequel s'ajustait, comme un écrou, une pièce d'acier évidée, au fond de laquelle, pour assurer la fermeture, on plaçait une forte rondelle de plomb. Une bille d'acier, introduite dans le canon, indiquait, par sa mobilité ou son immobilité, si l'eau du tube était ou non congelée. Exposé successivement, dans le courant de décembre et de janvier, à des températures extérieures qui varièrent de — 10° à — 24°, l'eau contenue dans le canon resta constamment liquide, ainsi que le tintement métallique produit par la chute de la bille d'acier sur le fond permit de s'en assurer. Mais aussitôt que le couvercle du canon fut dévissé et la pression supprimée, la congélation se fit instantanément. « En chauffant alors le canon de manière à détruire l'adhérence, l'on en

retira un cylindre de glace d'une grande transparence. Dans l'axe de ce cylindre, il y avait une rangée de très petites bulles d'air. »

§ 2. PHÉNOMÈNES DE SURFUSION.

Les expériences décrites dans le paragraphe qui précède prouvent qu'il est possible, dans certaines circonstances, d'abaisser la température d'un liquide au-dessous du point de solidification ou de congélation, sans que la solidification ait lieu. On nomme *surfusion* ce phénomène, qui est susceptible de se produire dans des conditions variées.

Fahrenheit et Blagden sont les premiers physiciens qui aient appelé l'attention sur ces faits. En 1724, Fahrenheit, ayant empli d'eau un ballon de verre à col effilé et empêché le contact de l'air avec le liquide en fermant le tube à la lampe, put maintenir le ballon à plusieurs degrés au-dessous de zéro sans que l'eau fût congelée. Ayant brisé la pointe effilée, l'air put rentrer, et la solidification se fit instantanément, effet qu'il attribua au contact de l'air. Cependant, une seconde fois, transportant un ballon semblable, fermé, contenant de l'eau liquide au-dessous de zéro, il fit un faux pas qui secoua le ballon, et l'eau se congela subitement comme dans la première expérience. Ainsi le repos parfait du liquide paraît être une autre condition du phénomène. Pour que la surfusion se produise, il faut que le liquide soit refroidi lentement, protégé du contact de l'air, par exemple à l'aide d'une couche d'huile répandue à sa surface, soustrait à toute agitation brusque, ce qui est plus aisé si on l'enferme dans de petits vases, des tubes de faible diamètre. On abaisse ainsi la température de l'eau jusqu'à —12°. Despretz, en se servant de tubes thermométriques, constata que l'eau pouvait descendre jusqu'à —20° sans se congeler. On sait qu'elle se dilate de — 4° à 0°; or, en se refroidissant de 0° à —20°, son volume continue à

augmenter. Mais lorsqu'elle se solidifie, l'expansion brusque du volume brise le tube qui la contient.

Un fait important ressort des expériences effectuées jusqu'ici sur la surfusion : c'est que, quel que soit l'abaissement de la température du liquide au-dessous de son point ordinaire de solidification, quand celle-ci vient à se produire, aussitôt la température de toute la masse solidifiée remonte au point fixe. Ainsi l'eau refroidie par Gay-Lussac et par Despretz jusqu'à — 12° et — 20° revient aussitôt à zéro dès qu'elle se solidifie. Cette augmentation subite de la température ne peut être attribuée qu'à l'action de la chaleur latente de liquidité, laquelle se dégage aussitôt que commence la congélation, et devient sensible en échauffant jusqu'au point normal de solidification les parties encore liquides, que cette addition de chaleur n'empêche point de se congeler.

On doit à M. L. Dufour des études intéressantes du phénomène de la surfusion, faites par une méthode qui a permis à ce savant de mieux spécifier les conditions de sa production. « En isolant, dit-il, l'eau de tout contact solide, en plaçant ce fluide dans un milieu qui ait la même densité et qui ne forme pas de mélanges aqueux, j'ai pu obtenir beaucoup plus sûrement le retard de la congélation. L'eau, dans un mélange en proportions convenables de chloroforme et d'huile, prend la forme de sphères parfaites et se maintient en équilibre dans l'intérieur du mélange. Si l'on refroidit ce mélange, on remarque que l'eau dans cet état globulaire et dans cet isolement de tout solide, ne gèle presque jamais à 0° ; sa température s'abaisse à —6°, —10°, etc., avant que le changement d'état ait lieu. Des globules ont même été amenés ainsi, encore liquides, à 20° au-dessous de zéro.

« Il s'agit ici d'eau ordinaire, ni distillée ni même bouillie. L'huile qui, après divers essais, a paru le mieux convenir pour ces refroidissements assez considérables, est l'huile d'amandes douces. »

M. Dufour a trouvé que, dans ces conditions, l'état liquide

présente une remarquable stabilité. Des globules de 5 à 6 millimètres de diamètre ont pu être agités, déformés sans que la solidification se produise; on pouvait même y introduire, par des températures de —10°, des corps étrangers, des cristaux salins. Mais, au contraire, l'introduction d'un fragment de glace provoquait toujours et instantanément la congélation. L'étincelle d'une bouteille de Leyde, le passage d'un courant électrique ont été impuissants à produire le changement d'état, mais la décharge d'une machine de Ruhmkorff le provoquait toujours.

La même méthode a permis à M. Dufour de constater le phénomène de la surfusion avec le soufre, le phosphore, la naphtaline. Des globules de soufre en suspension dans une dissolution de chlorure de zinc, ont été refroidis au-dessous de 115°, jusqu'à 50°, sans cesser d'être liquides; des gouttes de phosphore ont été maintenues liquides jusqu'à 0°. La naphtaline, qui se solidifie à 79°, a été conservée liquide dans l'eau jusqu'à 55°. Dans ces diverses expériences, comme on vient de le dire pour l'eau, la solidification se fait instantanément si l'on introduit dans le liquide un fragment solide de la substance en expérience.

Le phénomène de la surfusion a été l'objet de recherches nouvelles de la part de M. Gernez. Ce savant a constaté, comme M. Dufour, que la solidification du liquide se fait instantanément par l'introduction d'une très petite quantité de la matière à l'état solide ou pulvérulent; il a fait voir en outre que le contact d'une parcelle solide d'un corps isomorphe ou même le simple frottement de deux corps solides au sein du liquide produisaient le même effet.

On a vu plus haut que, pour être amené à l'état de surfusion, un liquide doit être, autant que possible, soustrait à toute cause d'agitation. Cependant le mouvement des masses liquides paraît, au contraire, favoriser l'abaissement de la température au-dessous du point de leur fusion, comme on le voit par l'exemple de l'eau des rivières et des fleuves qui ne se con-

gèlent que lorsque la température de l'air extérieur s'est abaissée notablement au-dessous de zéro. Il est vrai qu'il s'agit là d'un mouvement de masse, tandis que, dans l'exemple de la solidification qui serait produite par une agitation brusque, il s'agit d'un mouvement des molécules au sein du liquide.

§ 3. LIQUÉFACTION PAR VOIE DE DISSOLUTION. — SOLUTIONS SATURÉES ET SURSATURÉES.

Le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide ne se fait pas seulement par voie de *fusion*, ou par l'action directe de la chaleur portée à une température déterminée ; il peut s'opérer aussi par voie de *dissolution*. On entend par là, d'une manière générale, l'acte par lequel un liquide forme, avec un autre corps solide, liquide ou gazeux, un nouveau liquide homogène. Nous n'avons à nous occuper ici que de la dissolution des solides, en faisant abstraction d'ailleurs du côté chimique du phénomène.

L'examen le plus simple et le plus familier de la dissolution d'un solide est celui d'un morceau de sucre ou de sel commun, qu'on met dans une certaine quantité d'eau. Au bout de peu de temps, le sucre ou le sel ne se distingue plus du reste du liquide. En l'agitant pour que le mélange soit complet, on a pour résultat un nouveau liquide homogène, de l'eau sucrée ou de l'eau salée. L'exemple que nous venons de prendre est celui d'une dissolution d'ordre purement physique, ou une dissolution simple ; mais le plus souvent une action chimique, une combinaison, intervient dans le phénomène. Par exemple, en dissolvant l'acide sulfurique anhydre, l'eau réagit chimiquement sur ce corps, et forme en réalité avec lui un nouveau composé, et non une simple dissolution : il s'est fait un nouveau groupement de molécules entre les deux corps en présence. Le dégagement de chaleur qui se produit alors montre bien l'énergie de la réaction.

En général, l'acte de la dissolution entraîne une absorption de chaleur, et, sous ce rapport, le phénomène a de l'analogie avec celui de la fusion. Nous verrons plus tard que l'abaissement de température qui résulte de la dissolution, est utilisé pour produire un froid artificiel dont le degré dépend de la nature des corps qu'on mélange, de leur proportion, et de leur température initiale. Voici quelques nombres qui permettront de juger de ces diverses influences; nous les empruntons au *Dictionnaire de chimie* (art. Dissolution) de Wurtz, qui les cite d'après les déterminations de Rüdorff :

Sels dissous.	Quantité mélangée avec 100 p. d'eau.	Température initiale.	Température finale.	Abaissement de température.
Alun cristallisé.	14	+10°,8	+9°,4	1°,4
Chlorure de sodium.	36	12°,6	10°,1	2°,5
Sulfate de sodium cristallisé.	20	12°,5	5°,7	6°,8
Chlorure de potassium . . .	30	13°,2	0°,6	12°,6
Azotate de sodium	75	13°,2	— 5°,3	18°,5
Iodure de potassium	140	10°,8	—11°,7	22°,5
Azotate d'ammonium. . . .	60	13°,6	—13°,6	27°,2
Sulfocyanate de potassium. .	150	10°,8	—23°,7	34°,5

Tous les corps ne se dissolvent pas également ou en mêmes proportions dans les mêmes liquides. L'eau dissout la plupart des sels métalliques; et certains sels, comme l'acide acétique et l'acide formique, s'y mêlent en toutes proportions. Les corps gras, insolubles dans l'eau, se dissolvent dans l'éther, dans les carbures ou les huiles.

Un poids donné du liquide dissolvant n'est ordinairement capable de dissoudre qu'une quantité limitée du corps. A ce point précis, on dit qu'il est *saturé*. Mais ce point de saturation dépend de la température, et la quantité maximum de la substance dissoute va généralement en croissant avec la température, et quelquefois proportionnellement à celle-ci. Mais il n'en est ainsi que si le solide ne contracte aucune union chimique avec le dissolvant. Gay-Lussac a représenté par des courbes la solubilité d'un certain nombre de sels et les relations de cette solubilité avec la température. La figure 69

donne un certain nombre de ces courbes, qui permettent de trouver aisément quelle quantité de chaque sel se dissout dans 100 parties d'eau, à une température quelconque comprise entre 0° et 120°. Les températures sont indiquées par les abscisses des courbes, tandis que les ordonnées figurent les proportions du sel dissous. Un simple coup d'œil jeté sur ce tableau graphique permet de reconnaître la loi suivie par la

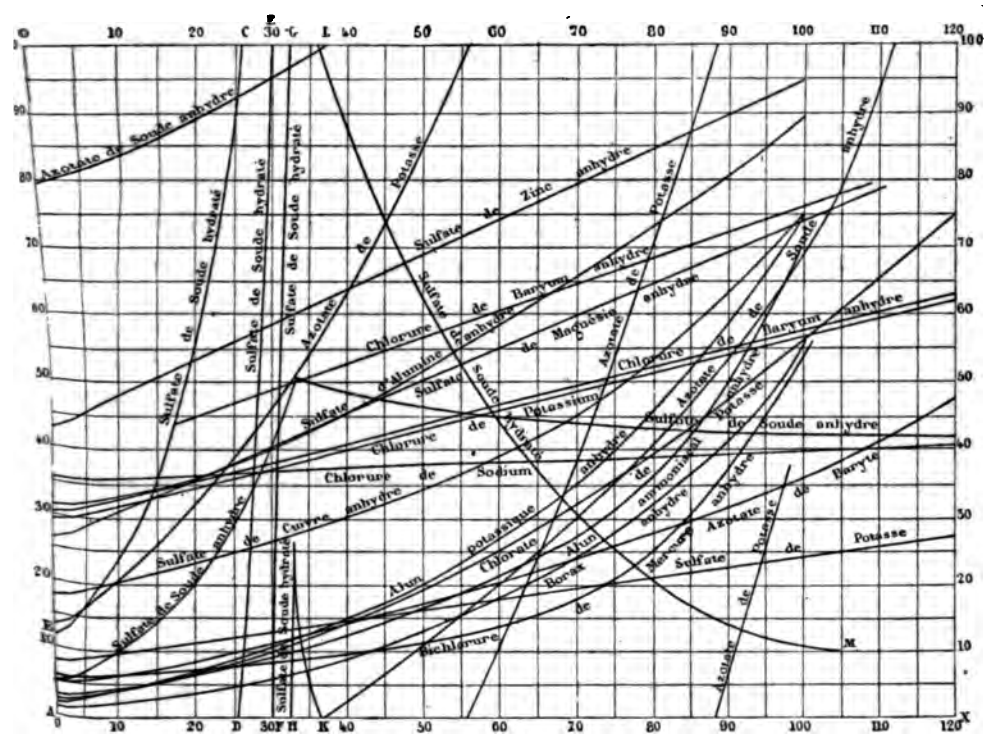


Fig. 69. — Courbes de solubilité de certains sels, d'après Gay-Lussac.

solubilité de chaque substance. C'est ainsi que la solubilité des chlorures de potassium et de baryum et du sulfate de zinc, qui est représentée par des lignes droites, est proportionnelle à la température; celle des azotates de potasse, de baryte, de soude, qui tournent la convexité de leurs courbes vers les abscisses, croît plus rapidement que la température. Le chlorure de sodium est représenté par une ligne droite presque horizontale, ce qui indique que sa solubilité est presque indépendante de la température.

Plusieurs courbes s'élèvent trop rapidement pour qu'elles aient pu être figurées dans le tableau par une ligne unique : telles sont celles des azotates de soude et de potasse et du sulfate de soude cristallisé; elles sont divisées en fragments qu'on supposera réunis, en prolongeant le tableau verticalement. Cela tient à la grande solubilité de ces sels. Le dernier offre une particularité intéressante : sa solubilité va en croissant avec la température, mais seulement jusqu'à 33°; elle est représentée jusque-là par les fragments BC, DE, FG et HI et la position du point I marque une proportion de 327 pour 100 du sulfate de soude dissous. Alors, la température continuant de croître, la solubilité du sel diminue; elle est figurée dans ce cas par les courbes IK et LM; le point M correspondant à la température de 105° a une ordonnée égale à 10, ce qui montre qu'alors la solubilité n'est pas plus grande qu'à 0°.

Nous avons dit plus haut qu'une solution ne pouvait contenir qu'une proportion donnée d'un corps pour chaque température. Alors elle est saturée. Si on élève la température, en général cet état de saturation disparaît, le liquide devenant susceptible de dissoudre une nouvelle quantité du corps. Mais qu'arrive-t-il lorsqu'on laisse refroidir la solution saturée au-dessous du point de saturation? Dans ce cas, il peut se présenter deux alternatives différentes, tout comme dans le cas d'un liquide refroidi au-dessous du point de fusion. Ou bien, l'excès de sel dissous se dépose sous forme de cristaux, soit à la surface de la dissolution, soit à l'intérieur contre les parois du vase qui la renferme, aux points où ces parois offrent des aspérités; c'est ce qui arrive quand le refroidissement se fait lentement. Ce retour à l'état solide par voie de cristallisation correspond à la solidification d'un liquide amené au-dessous du point de fusion. Ou bien, la solution soumise au refroidissement reste claire et limpide, sans qu'il y ait formation de cristaux, et sa température peut être abaissée ainsi bien au-dessous du point de saturation. On dit alors qu'elle est *sursaturée*.

La ***sursaturation*** correspond au phénomène de la surfusion et se produit dans des circonstances analogues, c'est-à-dire lorsque la solution est à l'abri de l'air, de l'agitation, et surtout à la condition qu'on n'y laisse tomber aucune parcelle solide du corps dissous ou d'un corps isomorphe. On la fait donc cesser brusquement par la projection d'un tel fragment; alors la cristallisation se produit spontanément, et il arrive, comme pour la surfusion, que la température remonte précisément au point correspondant à la saturation.

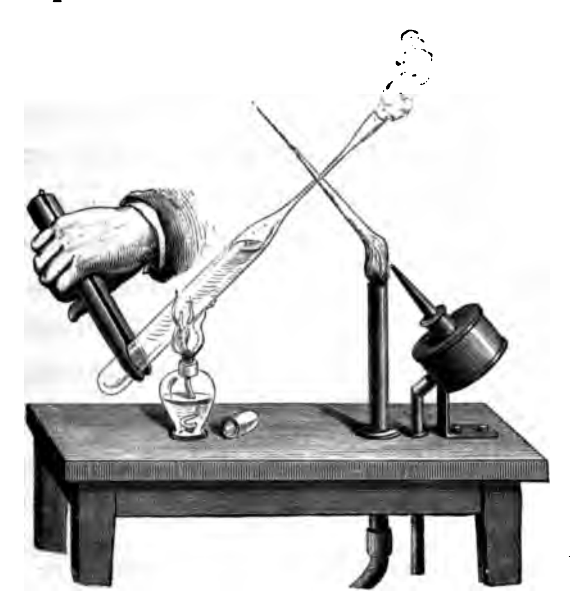


Fig. 70. — Procédé pour obtenir une solution sursaturée.

Pour obtenir aisément une solution sursaturée, on procède comme l'indique la disposition de la figure 70. Un tube terminé par une partie très effilée contient une dissolution concentrée, de sulfate de soude par exemple, qu'on a eu soin d'introduire à une température élevée; on chauffe le tube à l'aide d'une lampe à alcool. Jusqu'à ce que le liquide entre en ébullition (vers 103°), la vapeur chasse l'air, et l'on ferme alors le tube à la lampe. Si l'on laisse refroidir lentement la solution ainsi obtenue au-dessous du point de saturation, elle reste claire et limpide. Mais si l'on brise la pointe effilée du

tube, la rentrée brusque de l'air détermine aussitôt la cristallisation.

M. Gernez, qui a fait une étude approfondie des phénomènes qu'on observe dans les solutions sursaturées, a mis en évidence le dégagement de chaleur dû à une cristallisation rapide. Voici deux expériences fort élégantes et fort démonstratives relatives à ce point. Dans le vase qui contient une solution sursaturée d'hyposulfite de soude, on plonge un thermomètre à air, qu'on a soin de bien nettoyer pour éviter une cristallisation prématurée et on note la position de l'index. Puis on projette un fragment de cristal d'hyposulfite de soude dans le liquide, ce qui provoque la cristallisation : on voit alors aussitôt l'index du thermomètre prendre un mouvement rapide d'ascension. On peut aussi verser à la surface de la solution une couche d'éther qui entre en ébullition dès que la cristallisation commence; si l'on a préalablement adapté à l'orifice du vase un bouchon traversé par un tube, la vapeur d'éther sort par le tube et on peut l'enflammer de manière à rendre le phénomène d'élévation de température visible pour tout un amphithéâtre.

§ 4. CRISTALLISATION DES SOLUTIONS SALINES, SATURÉES OU SURSATURÉES.

Dans les solutions saturées, comme dans les solutions sursaturées, le passage de l'état liquide à l'état solide se fait par voie de cristallisation. Cette structure intéressante des corps solides, qui nous montre leurs molécules orientées d'une façon régulière et géométrique, groupées en édifices architecturaux qui se répètent en variant de grosseur, depuis les grains les plus petits, jusqu'aux fragments volumineux, n'est pas du reste particulière aux corps dissous dans un liquide. Ceux qui sont devenus liquides eux-mêmes par la voie de la chaleur, cristallisent pareillement, quand le passage à l'état solide se fait dans certaines conditions. Ceux qui, comme le verre, les

résines, passent par un état pâteux avant de se solidifier, et prennent alors un aspect vitreux, sont généralement amorphes, homogènes, doués d'une certaine transparence comme est un liquide figé : ils n'offrent pas de structure cristalline. Le verre, le sucre fondu figé, ou sucre de pomme, le sélénium vitreux, etc., sont dans ce cas. Cependant, dans ces solides même, il se fait à la longue un travail interne de cristallisation qui leur fait perdre leur transparence et leur homogénéité.

Les corps en fusion qui reprennent l'état solide par un refroidissement lent et régulier, cristallisent comme les solutions saturées : les premiers cristaux apparaissent à la surface ou sur les parois du vase, c'est-à-dire dans les régions où l'abaissement de température se fait d'abord sentir; peu à peu de nouveaux cristaux recouvrent les premiers, et à la fin toute la masse est cristallisée, comme on s'en aperçoit le plus souvent, en examinant la surface des cassures. Cette texture cristalline apparaît nettement quand on examine ainsi un morceau de bismuth, d'antimoine, de soufre. Mais si l'on veut obtenir des cristaux isolés, il faut arrêter la solidification avant qu'elle soit complète, ce qui se fait en décantant l'excès de liquide. Supposons qu'on ait fait fondre du soufre dans un creuset en terre en le chauffant jusqu'à 120° environ, puis qu'on le laisse refroidir lentement. Quand il atteindra la température de 112°, la cristallisation commencera en s'étendant de la surface et des parois au centre. On perce alors la croûte supérieure solidifiée à l'aide d'une tige chauffée, on renverse le vase, et on fait écouler le liquide non encore solidifié. On obtient ainsi une magnifique agglomération de cristaux d'un jaune brunâtre, ayant la forme d'aiguilles prismatiques dirigées vers le centre (fig. 71). Cette forme n'est pas celle des cristaux de soufre tels qu'on les rencontre dans la nature : ceux-ci sont des octaèdres rhombiques (fig. 72), tandis que les premiers sont des prismes rhomboïdaux obliques. On caractérise ces deux états allotropiques du soufre, en nommant le premier *soufre prismatique*, le second *soufre octaédrique*. Quand on abandonne à eux-

mêmes, à la température ordinaire, les cristaux prismatiques, ils ne tardent pas à perdre leur transparence et leur couleur brun-jaunâtre, et ils se convertissent en cristaux octaédriques. Cette transformation singulière montre que la forme prismatique n'est pas stable et elle rend parfaitement compte du fait que les cristaux de soufre naturel sont toujours octaédriques. Le passage d'une forme à l'autre est favorisé par le choc, le frottement, le contact avec un cristal octaédrique. M. Schützenberger a obtenu des cristaux de cette seconde forme en abandonnant à l'évaporation spontanée une solution de soufre dans le sulfure de carbone : les cristaux obtenus sont volumineux et semblables en tout aux cristaux naturels. Enfin, on doit à

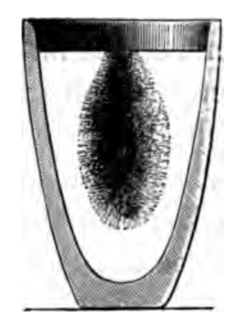


Fig. 71. — Cristallisation du soufre.



Fig. 72. — Cristal de soufre octaédrique.

M. Gernez un moyen fort ingénieux d'obtenir à volonté des cristaux de soufre prismatiques et des cristaux octaédriques. Il prend, dans ce but, une dissolution de soufre soit dans la benzine, soit dans le toluène, qui se fait à une température inférieure à 80°; il la laisse refroidir jusqu'à 15° en ayant soin de mettre le liquide à l'abri des poussières atmosphériques. La solution sursaturée ainsi obtenue cristallise sous l'une ou l'autre forme, selon que l'expérimentateur y projette un fragment de cristal prismatique ou un fragment octaédrique. Bien mieux, M. Gernez a réussi à produire simultanément les deux effets dans une même solution sursaturée, en plaçant les cristaux générateurs en deux points différents du liquide.

Ceci nous ramène à la question de la cause de la cristallisation dans les solutions sursaturées. Ce que nous en avons déjà dit suffit pour faire présumer que cette cause est tout entière dans la présence au sein du liquide d'un fragment de la substance dissoute cristallisée. Les expériences de M. Viollette et celles de M. Gernez ont mis cette vérité en pleine lumière. Il résulte de ces expériences que le plus grand nombre des solutions restent sursaturées, du moins entre certaines limites de température, à la condition qu'on les préserve de tout contact avec un cristal du corps dissous. Pendant de longs mois, on peut conserver ainsi à l'état liquide des solutions d'acétate, de sulfate et d'hyposulfite de soude, d'azotate de chaux, d'alun ammoniacal, maintenues à la température ordinaire. Mais la cristallisation est instantanée si l'on y introduit la moindre parcelle du sel en dissolution. Certaines de ces substances, notamment le sulfate de soude, l'azotate d'ammoniaque, se trouvent constamment en suspension dans l'air, disséminées dans les autres poussières atmosphériques, ce qui a été reconnu par M. Gernez en examinant au spectroscope l'eau qui a servi à laver l'air avant son introduction dans le ballon contenant une solution : la raie de la soude s'y est montrée constamment. De plus, la présence du sulfate de baryte y a été constatée. On fait dans les cours deux expériences intéressantes propres à montrer l'action d'un cristal sur la formation des cristaux dans les solutions sursaturées. La première de ces expériences, imaginée par M. Peligot, consiste à superposer dans une même éprouvette deux solutions sursaturées; la plus lourde est formée d'hyposulfite de soude, la plus légère d'acétate de soude, deux sels qui ne se rencontrent pas dans l'air, de sorte que ni l'une ni l'autre des solutions ne cristallisent à l'air libre. On les laisse refroidir; puis on introduit un cristal d'hyposulfite de soude dans la solution la plus dense. Le cristal traverse la solution d'acétate sans y rien changer, puis, arrivant dans l'autre, la cristallisation se fait autour du fragment (fig. 73, 1). En faisant la même opération avec un cristal d'acétate de

soude, c'est la première solution qui cristallise à son tour (fig. 73, 2)[1]. La seconde expérience montre que le champ de l'influence du cristal ne s'étend que peu à peu autour du point où il est plongé. Voici maintenant en quoi consiste la seconde des expériences en question : On étale sur une lame de verre

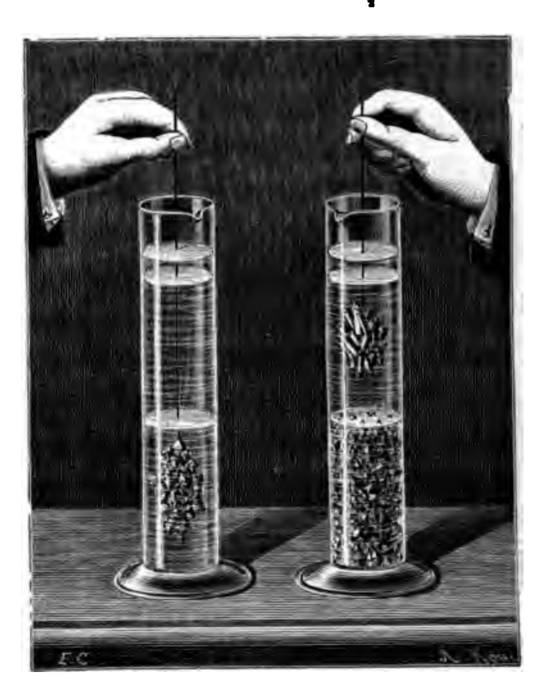


Fig. 73. — Influence du contact d'un cristal sur la cristallisation des solutions sursaturées. Expérience de M. Peligot.

une solution sirupeuse et froide d'azotate de chaux. Puis, à l'aide d'une baguette trempée dans de l'azotate de chaux solide et cristallisé, on trace au hasard des lignes dans le liquide. La cristallisation se dessine tout d'abord sur tout le parcours de

1. Le journal *la Nature*, à qui nous empruntons la description de cette remarquable expérience, en donne en ces termes la préparation : « On dissout 150 parties en poids d'hyposulfite de soude dans 15 parties d'eau ; on verse lentement la dissolution dans une éprouvette à pied, préalablement chauffée à l'aide d'eau bouillante, de façon à remplir le vase à moitié environ. On a dissous, d'autre part, 100 parties en poids d'acétate de soude dans 15 parties d'eau bouillante. On verse lentement cette solution sur la première, de façon qu'elle forme une couche supérieure et qu'elle ne se mélange pas avec celle-ci. Les deux solutions sont surmontées d'une petite couche d'eau bouillante. On laisse l'éprouvette refroidir lentement et au repos. » (*La Nature*, 1875, t. I, p. 304.)

a pointe de la baguette, où l'on voit des traînées d'un blanc opaque se former sur le fond transparent de la lame, jusqu'à ce que la solidification ait envahi toute la surface.

§ 5. L'EAU ET LA GLACE. — PHÉNOMÈNE DU REGEL.

L'eau joue un si grand rôle dans la nature, qu'il est important, pour l'explication d'un grand nombre de phénomènes naturels, de connaître à fond ses transformations sous l'influence des variations de température. Revenons donc sur les deux changements d'état de la fusion de la glace et de la congélation de l'eau.

On a vu que le point de congélation de l'eau peut être, dans certaines circonstances, abaissé considérablement. Les expériences que nous avons citées dans le § 2 montrent que ce phénomène de surfusion se produit notamment lorsqu'une forte pression extérieure empêche l'eau de prendre l'accroissement de volume que nécessite sa solidification. Lorsque la force d'expansion des molécules en voie de cristallisation l'emporte, les vases les plus résistants, des enveloppes métalliques, épaisses se brisent, la température remonte à 0°, et la solidification instantanée détermine des effets singuliers, dont les expériences du major Williams et celles de MM. Ch. Martins et Chancel nous ont offert de curieux spécimens. Nous reproduisons ici (fig. 74) deux effets du même genre obtenus par un savant professeur de l'Université de Bâle, M. Ed. Hagenbach. Le premier obus, mis en plein air, à une heure après midi, par une température de —12°, y resta jusqu'au lendemain à sept heures; la température, alors de —14°,6, était descendue pendant la nuit à —18°,4. L'obus avait éclaté, mais son bouchon en fer et à vis résista à l'explosion. Le second obus, après onze heures d'exposition à un froid dont le maximum était voisin de —20°, éclata pareillement, et son bouchon fut projeté au loin. La forme bizarre des jets de glace

sortis du projectile, des dards présentant la courbure d'un arc de la surface, mais l'un concentrique à cet arc tandis que l'autre a été retourné en sens contraire, toutes ces particularités singulières du phénomène, sont judicieusement expliquées dans la description du savant observateur, description à laquelle nous devons renvoyer le lecteur pour les détails. Ce que nous devons en retenir, c'est que la congélation instantanée qui se produit au moment où l'eau en surfusion fait céder le bouchon ou les parois de l'obus par sa force expansive, ne saisit pas à la fois toute la masse du liquide intérieur. La chaleur dégagée



Fig. 74. — Obus brisés par la force expansive de la glace[1].

par la solidification de cette masse est plus considérable que celle qui serait nécessaire pour la ramener, de la température de — 15° qu'elle avait, à zéro. Il reste donc encore de l'eau liquide à l'intérieur, ainsi que nous l'avons vu déjà dans les expériences de MM. Ch. Martins et Chancel.

Puisque la pression abaisse le point de congélation de l'eau, appliquée à un morceau de glace elle doit être susceptible de le liquéfier en partie, sans que la température s'abaisse au-dessous de zéro. Cette conséquence des expériences de

1. Nous devons l'autorisation de reproduire ces deux dessins à l'obligeance de M. G. Tissandier, rédacteur en chef de *la Nature*, qui les a publiés, d'après des photographies, dans le numéro, du 4 septembre 1880.

W. Thomson, décrites plus haut, a été vérifié expérimentalement, et a servi à expliquer la plasticité observée dans les masses de glace des glaciers. Faraday, puis Tyndall ont étudié toutes les circonstances de ce phénomène intéressant. Arrêtons-nous un instant aux résultats des recherches de ces savants physiciens.

Vers 1850, Faraday remarqua que si l'on met en contact, par deux de leurs faces, deux morceaux de glace fondante, ils se soudent ensemble aux points de contact. Ce phénomène a reçu du docteur Hooker le nom de *regélation* ou de *regel*, sous lequel il est maintenant communément désigné. Tyndall a imaginé une série d'expériences où le fait du regel est mis en évidence. « Sciez, dit-il, deux plaques d'un bloc de glace, et mettez en contact leurs surfaces planes ; elles se souderont immédiatement ensemble. Deux plaques de glace, posées l'une sur l'autre, et que l'on laisse pendant une nuit enveloppées de laine, sont quelquefois si solidement soudées l'une à l'autre le lendemain, qu'elles casseront plutôt partout ailleurs que sur la surface de jonction. Si vous entrez dans une des cavernes de glace de la Suisse, vous n'avez qu'à appuyer pendant un instant une plaque de glace contre la paroi supérieure de la caverne pour en déterminer l'adhérence complète à cette paroi.

« Mettez dans un bassin d'eau plusieurs fragments de glace, et rapprochez-les de manière qu'ils se touchent ; ils se soudent ensemble aux points de contact. Vous pouvez former une chaîne de ces fragments ; et ensuite, si vous saisissez un des bouts de la chaîne, vous entraînerez à sa suite toute la série. C'est ainsi que des chaînes de gros glaçons se forment quelquefois dans les mers polaires.

« Voyons ce qui résulte de ces observations. La neige se compose de petites parcelles de glace. Alors, si par la pression nous chassons l'air que contient la neige fondante, et que nous amenions les petits grains de glace à se toucher, ils devront se souder ensemble ; et, si l'air est complètement expulsé, la

neige comprimée devra présenter l'aspect de la glace compacte[1]. »

C'est ce que savent à merveille les enfants, lorsqu'ils façonnent la neige en boules par la pression dans leurs mains. Ils savent aussi que c'est surtout quand la neige commence à fondre qu'elle se transforme le mieux en boules compactes. Si sa température est assez inférieure à 0° pour que la chaleur de la main n'ait pas le pouvoir de la ramener en masse au point de fusion, elle reste friable et forme une poudre sèche qui s'agrège difficilement, même avec l'aide d'une forte pression.

En comprimant, à l'aide d'une presse hydraulique, des mor-



Fig. 75. — Moulage de la glace.

ceaux de glace dans des moules de formes variées, Tyndall parvenait à les transformer en une masse compacte et homogène, parfaitement transparente et ayant pris la forme du moule : des sphères, des cylindres, des coupes, des anneaux de glace étaient ainsi obtenus par le broiement des fragments de glace sous l'action d'une pression énergique et par le regel des morceaux de plus en plus petits. Le même résultat s'obtient en employant une quantité suffisante de neige. La figure 75 représente les deux parties d'un moule en buis, dont le physicien anglais se servait pour obtenir une coupe hémisphérique de glace. L'une des parties est un hémisphère creux ; l'autre,

1. *Les glaciers et les transformations de l'eau,* 1 vol. de la Bibliothèque scientifique internationale.

qu'on applique sur la première remplie de fragments de glace, est une protubérance également hémisphérique, mais de moindre dimension que la première. La compression produite par une petite presse hydraulique donnait une coupe que Tyndall, dans ses leçons, « pouvait remplir, dit-il lui-même, de vin de Xérès frais, sans en perdre une goutte ».

D'après J. et W. Thomson, tous ces phénomènes de regel sont dus à une même cause, l'influence de la pression sur la température de fusion de la glace. Quand deux morceaux de glace sont pressés l'un contre l'autre, celles de leurs parties qui sont comprimées entrent en fusion. Mais ce changement



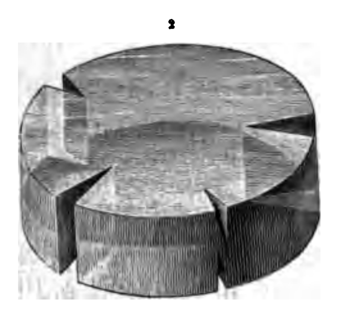


Fig. 76. — 1, cylindre de glace obtenu par le regel; 2, le même, comprimé par ses deux faces.

d'état n'est possible que par une absorption de la chaleur prise à la glace environnante. Cette chaleur devient latente dans l'eau de fusion, tandis que la température de la glace s'abaisse au-dessous de 0°. Si alors la pression cesse, le froid produit détermine le regel de l'eau emprisonnée entre les parties de la glace mises en contact, et ces parties se trouvent ainsi soudées entre elles. La pression nécessaire à la production du phénomène du regel peut être très petite; par exemple, lorsqu'on pose simplement un morceau de glace sur un autre, la faible pression qui résulte du poids de la glace suffit. Alors, il est vrai, le contact n'ayant lieu le plus souvent qu'en un petit nombre de points, chacun des points reçoit une part plus forte du poids

total. Tyndall cite une expérience curieuse due à M. Bottomley, destinée à montrer que la liquéfaction due à la pression et le regel qui la suit, s'effectuent avec beaucoup plus de rapidité quand la pression est concentrée sur une faible surface. « Appuyons, dit-il, sur des blocs de bois les deux extrémités d'une barre de glace de 25 centimètres de long sur 10 d'épaisseur et 7 de large, et faisons passer sur le milieu de cette barre un fil de cuivre de 1 ou 2 millimètres de diamètre. Si nous réunissons les deux extrémités de ce fil, et que nous y suspendions

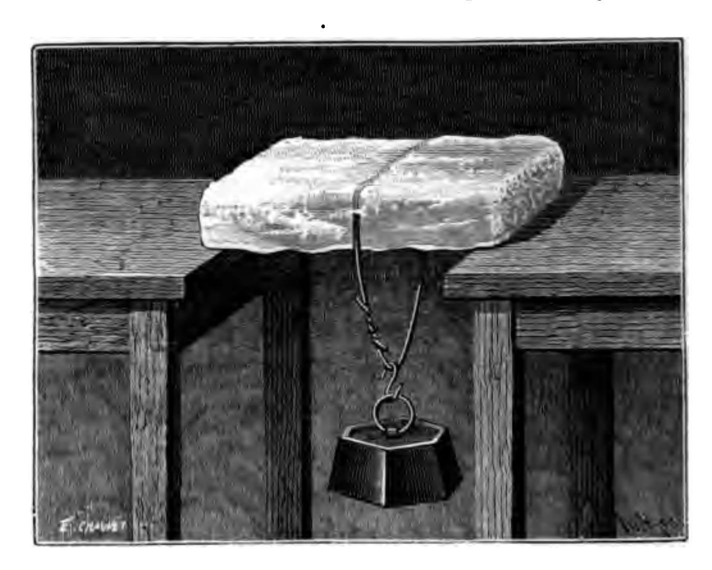


Fig. 77. — Expérience de Bottomley. Section d'un bloc de glace par un fil métallique.

un poids de 6 ou 7 kilogrammes, toute la pression exercée par ce poids portera sur la glace qui soutient le fil. Qu'en résulte-t-il? La glace qui est sous le fil se liquéfie ; l'eau de liquéfaction s'échappe autour du fil; mais dès qu'elle n'est plus soumise à la pression, elle se congèle, de sorte que tout autour du fil, avant même qu'il ait pénétré dans la glace, il se forme une enveloppe de glace. Le fil continue à pénétrer dans la glace : l'eau s'échappe sans cesse, et, à mesure, se congèle derrière le fil. Au bout d'une demi-heure, le poids tombe ; le fil a traversé la glace dans toute son épaisseur. On voit nettement la trace de son passage, mais les deux morceaux de la barre de

glace se sont ressoudés si solidement, que la barre cassera sur tout autre point aussi bien qu'à la surface de regel[1]. »

Faraday a proposé une explication du phénomène du rege autre que celle de Thomson. Selon lui, le point de fusion est plus élevé au centre ou à l'intérieur d'un morceau de glace qu'à la surface : pour une molécule de l'intérieur, la force de cohésion des molécules qui l'entourent s'exerce de tous côtés pour s'opposer au changement d'état ; à la surface, elle est dégagée d'une partie de cette action. De plus, la glace solide exerce sur l'eau avec laquelle elle est en contact un pouvoir special de solidification, analogue à celui que tout cristal exerce au sein du liquide de même nature où il est en suspension. Quand deux morceaux de glace sont mis en contact, la lame liquide qui les recouvre se trouve à l'intérieur, et le pouvoir de solidification agit alors des deux côtés de la lame liquide : celle-ci se congèle donc sous cette influence et les morceaux de glace se trouvent soudés. Tyndall, tout en admettant cette explication de Faraday, ne nie point l'influence de la pression.

Quelle que soit celle des deux théories que l'on adopte, le phénomène du regel n'en est pas moins certain. Nous verrons plus tard qu'il suffit pour expliquer les transformations que subit la masse d'un glacier et la façon merveilleuse dont cette masse se moule peu à peu sur la vallée qu'elle remplit ; de même que l'apparente plasticité qui résulte du regel, jointe à l'influence irrésistible de la pesanteur, rend compte des mouvements de progression de la même masse, depuis les régions supérieures où elle se forme par l'agglomération des couches de névé, jusqu'au bas de la vallée où elle s'écoule en torrents d'eau boueuse.

1. Tyndall, *Les glaciers et les transformations de l'eau.*

CHAPITRE VIII

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS — ÉBULLITION ET VAPORISATION DES LIQUIDES

§ 1. SUBLIMATION ET ÉVAPORATION.

Pour passer à l'état de gaz ou de vapeur, la plupart des corps solides doivent être préalablement fondus ou liquéfiés. Cependant le camphre, l'iode, l'arsenic et quelques autres substances diminuent de poids à l'air libre, sans passer par l'état liquide : ce passage direct d'un corps solide à l'état gazeux est connu sous le nom de *sublimation*. Inversement, la vapeur des corps en question, convenablement refroidie, peut se solidifier sans passer par l'état liquide, et l'on utilise cette propriété pour obtenir des cristaux plus ou moins volumineux. La neige, la glace émettent aussi des vapeurs sans se fondre préalablement ; tout le monde a pu observer ce fait par les temps secs et de fortes gelées : des fragments de glace ou des monceaux de neige diminuent sensiblement de volume, ou même disparaissent tout à fait, sans qu'il y ait eu aucune fusion partielle.

Quant aux liquides, la plupart se réduisent spontanément en vapeur, à des températures très différentes. L'eau qu'on place dans un vase ouvert, peu à peu disparaît ; les objets mouillés se sèchent avec une rapidité d'autant plus grande que la température est plus élevée et l'air environnant moins humide ; placés dans un courant d'air, l'eau dont ils sont imbibés

se réduit encore plus vite en vapeur. Le mercure, aux températures ordinaires, s'évapore : c'est ce que Faraday a mis hors de doute par l'expérience suivante : Il suspendit une feuille d'or dans un flacon contenant du mercure ; au bout de quelque temps, il trouva la feuille blanchie. Le mercure s'était combiné avec l'or, ce qui ne pouvait avoir eu lieu que par l'évaporation du premier. Mais d'autres liquides, l'acide sulfurique, les huiles grasses, ne jouissent pas de cette propriété. Bellani laissa pendant deux ans une feuille de zinc bien décapée suspendue dans un flacon qui renfermait de l'acide sulfurique concentré. Au bout de ce temps, il retira le métal, qui n'avait rien perdu de son éclat.



Fig. 78. — Phénomène de l'ébullition.

Ce premier mode de passage des liquides à l'état gazéiforme est ce qu'on nomme l'*évaporation*. Il est caractérisé par ce fait qu'il a lieu, pour un même liquide, à une température quelconque, et que c'est seulement par les couches superficielles qu'il s'effectue. La *vaporisation*, au contraire, est la réduction en vapeur sous l'influence d'une élévation de température, au moment où cette température atteint une limite fixe, déterminée pour chaque liquide, et constante pour une même pression extérieure. Le liquide alors entre en *ébullition*, c'est-à-dire que sa masse est agitée par le passage des bulles de vapeur qui s'échappent des parois du vase qui le contient, et que leur légèreté spécifique élève à la surface.

Nous allons étudier successivement ces divers modes de passage des corps solides ou liquides à l'état gazeux.

Nous ne dirons que quelques mots sur la sublimation, ou sur la volatilisation, c'est-à-dire sur la transformation immédiate des solides en vapeurs : dans le chapitre suivant, nous

entrerons dans quelques détails sur le phénomène inverse, qui est utilisé pour obtenir des cristaux de certains corps. Rappelons seulement que la chaleur de l'étincelle électrique, et surtout celle de l'arc voltaïque obtenu par les piles les plus puissantes, a permis de volatiliser les métaux, le platine, l'or et les corps les plus réfractaires. tels que le charbon, la chaux, la magnésie, l'oxyde de zinc.

Ce qui caractérise l'évaporation, c'est-à-dire la formation spontanée des vapeurs à la surface d'un liquide, c'est qu'elle se fait généralement à toute température, bien qu'elle soit d'autant plus abondante que la température est elle-même plus élevée. Il en est ainsi jusqu'à ce que cette température atteigne un point qui est fixe pour chaque liquide, quand la pression extérieure reste la même ; alors a lieu le phénomène de l'ébullition et la vaporisation qui l'accompagne. L'évaporation est toujours accompagnée d'un abaissement de température, dû à l'absorption de la quantité de chaleur nécessaire pour le passage du liquide à l'état gazeux. Dans l'acte de la vaporisation, la chaleur qu'exige cette transformation est empruntée au foyer.

Voyons maintenant quelles sont les lois qui président à la formation des vapeurs.

§ 2. LOIS DE LA FORMATION DES VAPEURS DANS LE VIDE.

Le physicien anglais Dalton est le premier qui ait étudié expérimentalement les lois de la formation des vapeurs dans le vide. Voici quelles sont ces lois et comment on les vérifie.

Si l'on introduit dans le vide barométrique un certain volume d'un liquide quelconque, un centimètre cube d'alcool, je suppose, aussitôt on voit le niveau du mercure se déprimer et s'arrêter à un point *b*, dont la distance au niveau *a* d'un baromètre qui plonge dans la même cuvette que le premier tube (fig. 79), mesure la tension ou la force élastique de la

vapeur formée. Par là nous voyons déjà que dans le vide les liquides se réduisent spontanément en vapeur.

Supposons qu'une petite couche de liquide ait surnagé sur le mercure. Si l'on soulève alors le tube sans que sa partie inférieure cesse de plonger dans la cuvette, on remarque que le niveau reste en *b*, à la même hauteur qu'auparavant. Mais la couche liquide d'alcool diminue d'épaisseur à mesure qu'augmente l'espace qu'occupe la vapeur. Une nouvelle quantité de vapeur s'est donc formée sans que sa tension ait changé, et il en est ainsi jusqu'à ce que tout le liquide se soit évaporé. Dans ce cas, si l'on continue à soulever le tube, ce qui augmente naturellement l'espace que peut occuper la vapeur, le niveau du mercure s'élèvera, ce qui prouve que la tension de la vapeur diminue. Abaisse-t-on de nouveau le tube, le niveau baisse et revient au point *b*; mais si alors on continue le même mouvement, le niveau reste constant, en même temps qu'une portion croissante de la vapeur repasse à l'état liquide.



Fig. 79. — Évaporation spontanée d'un liquide dans le vide barométrique. Première loi de Dalton.

La figure 79 montre comment on dispose l'appareil nécessaire à la réalisation de cette première expérience. Sur une cuvette dont le fond est prolongé en dessous, de manière à permettre d'y plonger profondément un tube, on a disposé deux tubes barométriques, dont l'un reste fixe et sert seulement à donner la valeur de la pression atmosphérique pendant la durée de l'expérience. Le second tube

est placé verticalement dans l'axe du prolongement de la cuve. Avant l'introduction du liquide (eau, alcool, éther, etc.), les niveaux du mercure sont à même hauteur dans les deux tubes. A l'aide d'une pipette recourbée, on introduit le liquide à vaporiser, par l'ouverture inférieure du tube central, sous le mercure; grâce à sa légèreté spécifique, le liquide s'élève jusqu'à la chambre barométrique, où l'on observe les phénomènes que nous venons de décrire. Si d'abord on n'a laissé pénétrer que quelques gouttes liquides, elles disparaissent instantanément à leur arrivée dans la chambre barométrique; en introduisant de nouvelles gouttes, on voit la dépression du mercure aller en augmentant, jusqu'à ce que le liquide apparaisse à la surface du mercure, et c'est à partir de ce moment que la dépression cesse, indiquant que la force élastique de la vapeur a atteint son maximum. Ce maximum est invariable, quelle que soit la grandeur de l'espace vide où s'est faite la vaporisation, tant que le liquide reste en contact avec sa vapeur, et que la température ne change pas. On dit alors que l'espace en question est *saturé*. On met quelquefois en évidence cette invariabilité de la tension maximum en disposant trois tubes barométriques au-dessus d'une cuvette à mercure, comme le montre la figure 80, et en constatant dans tous la parfaite égalité du niveau.

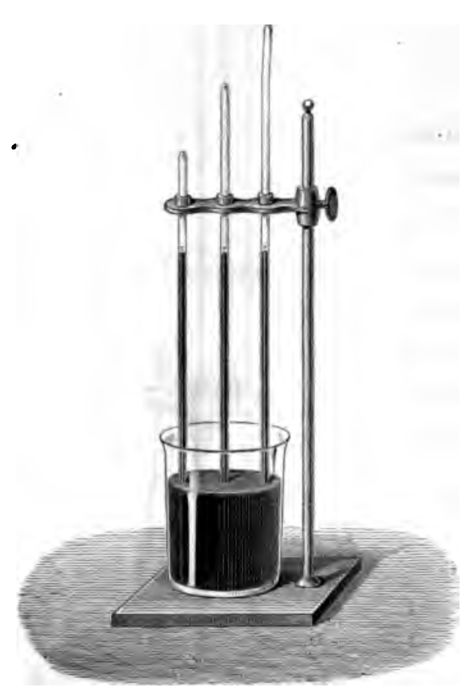


Fig. 80. — Invariabilité de la tension maximum d'une même vapeur à la même température.

Il résulte de ces premières expériences : 1° qu'un liquide

placé dans un espace vide s'y vaporise spontanément; 2° que la vapeur ainsi formée atteint un degré de tension maximum et invariable, tant qu'elle reste en présence d'un excès de liquide, pourvu que la température elle-même soit invariable. 3° Si l'espace n'est pas saturé, c'est-à-dire si la vapeur n'est pas en présence de son liquide, en faisant varier le volume qu'elle occupe, sa tension varie et la loi de la compressibilité est sensiblement la même qui régit les gaz, ou celle de Mariotte.

La tension maximum dépend à la fois de la nature du liquide et de la température. Voyons comment on détermine expérimentalement cette double dépendance.

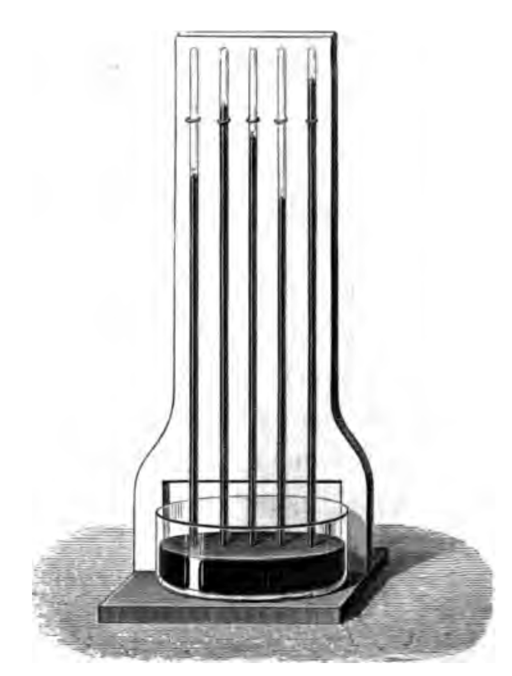


Fig. 81. — Inégalité des tensions maxima de diverses vapeurs à la même température.

Pour démontrer que la tension maximum dépend de l'espèce du liquide qu'on réduit en vapeur, on emploie l'appareil que représente la figure 81, et qui est connu sous le nom de *faisceau barométrique*. C'est un assemblage d'un certain nombre de tubes barométriques, dans lesquels on introduit divers liquides, par exemple, de l'eau, de l'alcool, de l'éther, de l'essence de térébenthine, etc., en quantité suffisante pour qu'à la température extérieure commune l'espace de chaque chambre soit saturé. On observe alors la différence de niveau du mercure dans les tubes à liquide, et on peut mesurer les différentes tensions par comparaison avec la hauteur du mercure dans le baromètre formé par le dernier tube à droite.

Nous allons voir maintenant que la tension maximum de la

vapeur va en augmentant, pour chaque liquide, avec la température. Pour démontrer cette loi, Dalton employait un appareil analogue à celui de la figure 79, mais dont les deux tubes étaient entourés d'un manchon en verre plein d'eau reposant sur la cuvette à mercure (fig. 82). On chauffait l'eau par l'intermédiaire du mercure, et à mesure que sa température indiquée par un thermomètre plongé dans le bain s'élevait, on voyait baisser le niveau du mercure dans celui des tubes dont la chambre contenait la vapeur expérimentée. On pouvait ainsi vérifier la loi tant que le niveau ne s'abaissait point jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette même, c'est-à-dire tant que la tension de la vapeur n'atteignait point la pression atmosphérique. Au delà, Dalton employait un tube recourbé analogue à celui qui sert pour la loi de Mariotte ; la portion fermée, la plus courte du tube, renfermait le liquide vaporisable et était plongée dans un bain dont la température était graduellement élevée. Le niveau du mercure dans la branche ouverte allait en s'élevant, et la tension de la vapeur pouvait se mesurer à chaque instant en ajoutant la hauteur barométrique à la distance verticale des niveaux du mercure dans les deux tubes.



Fig. 82. — Appareil de Dalton pour déterminer la tension des vapeurs au-dessus de 0°.

L'appareil que nous venons de décrire, représenté dans la figure 82, a servi à Dalton pour la mesure de la tension maximum des vapeurs au-dessus de zéro. La connaissance précise de cette tension à diverses températures, outre son importance scientifique, est indispensable dans les applications où la vapeur d'eau est employée comme force motrice ; aussi a-t-elle

été l'objet des recherches des physiciens; celles de Dalton, puis de Gay-Lussac, de Dulong et Arago, et enfin de notre savant et regretté Regnault, doivent être citées entre toutes; ce dernier a consacré notamment à cette question capitale ses merveilleuses facultés de précision dans les mesures et d'ingénieuse sagacité dans le choix des méthodes et la disposition des appareils. Indiquons sommairement ces méthodes.

Regnault procédait de trois manières différentes, selon que la température de la vapeur dont il voulait mesurer la force élastique était inférieure à 0°, ou comprise entre 0° et 60°, ou enfin supérieure à 60°. Dans le premier cas, il suivait la méthode employée avant lui par Gay-Lussac, à l'aide de l'appareil dont la figure 83 donne la disposition. Ce sont encore deux tubes barométriques ayant la même cuvette; mais celui qui doit recevoir le liquide à vaporiser a une chambre barométrique plus longue que l'autre, et recourbée de façon que son extrémité puisse être introduite isolément dans un vase rempli d'un mélange réfrigérant. Un thermomètre dont le réservoir est plongé dans ce mélange indique la température. A la vérité. par ce procédé, une portion seulement de l'espace occupé par la vapeur est à la température du mélange réfrigérant, et l'on pourrait craindre que la partie qui est en dehors n'influât sur la tension maximum cherchée et n'en augmentât la valeur. Mais il n'en est rien, et il n'y a nulle correction à faire de ce chef. En effet, d'après un principe qui est aussi important pour la théorie des vapeurs qu'il l'a été pour la pratique industrielle (il a conduit l'illustre Watt à l'invention du condenseur des machines à vapeur), dès qu'une vapeur remplit un

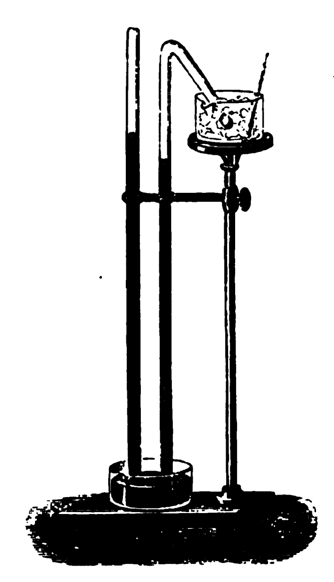


Fig. 83. — Mesure de la tension maximum d'une vapeur à une température inférieure à zéro

espace dont les parois sont à des températures différentes, sa tension maximum (en présence d'un excès de liquide) ne dépasse jamais celle qui correspond à la température la plus basse. C'est ce qu'on nomme le principe des ***parois froides.*** En examinant ce qui se passe dans le cas particulier de l'expérience que nous décrivons, on comprendra aisément ce principe. Le liquide, en arrivant dans la chambre barométrique, se vaporise en partie; la vapeur envahit la portion recourbée du tube et comme sa tension correspond à la température du liquide, plus élevée que celle du mélange, elle se condense sur la paroi froide; une nouvelle portion de vapeur se forme pour la remplacer, et ainsi de suite, jusqu'à ce que, par cette distillation, le liquide se soit rendu entièrement dans la partie recourbée du tube. La vapeur qui subsiste alors a pour tension maximum celle qui correspond à la basse température du mélange, etc. Cette tension est indiquée, comme dans les expériences de Dalton, par la différence de niveau du mercure dans les deux tubes.

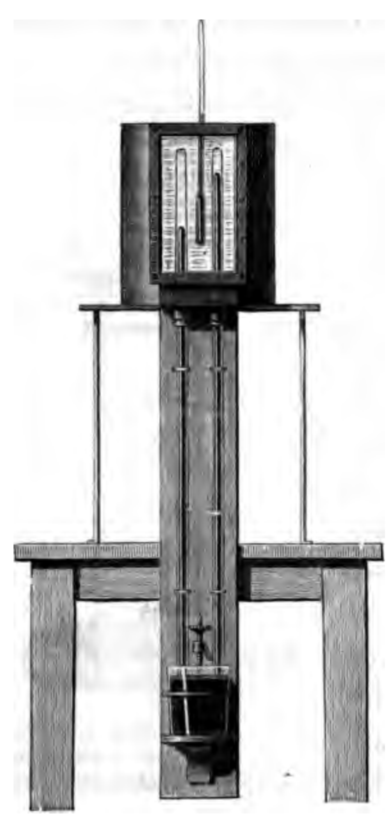


Fig. 84. — Appareil Regnault pour mesurer la tension des vapeurs de 0° à 60°.

Pour les températures comprises entre 0° et 60° environ, le procédé employé par Regnault est celui de Dalton, mais modifié de façon à éviter les causes d'erreur que ce dernier comportait. La principale provenait de la difficulté d'avoir une température uniforme dans un manchon d'une grande hauteur. Dans l'appareil de la figure 84, la caisse qui renferme l'eau que chauffe par-dessous une lampe à alcool est peu élevée; elle n'enveloppe

que la partie supérieure des tubes, de sorte qu'il est facile à l'aide d'un agitateur d'uniformiser la température de toutes les parties du bain. Une glace plane laisse voir les niveaux du mercure, dont Regnault mesurait la hauteur au-dessus de celui de la cuvette à l'aide du cathétomètre. Les dimensions restreintes de la caisse limitent naturellement le procédé à la mesure des tensions pour une température modérée, entre 0° et 50° ou 60°.

Pour les températures supérieures à 60° et à 100°, la méthode

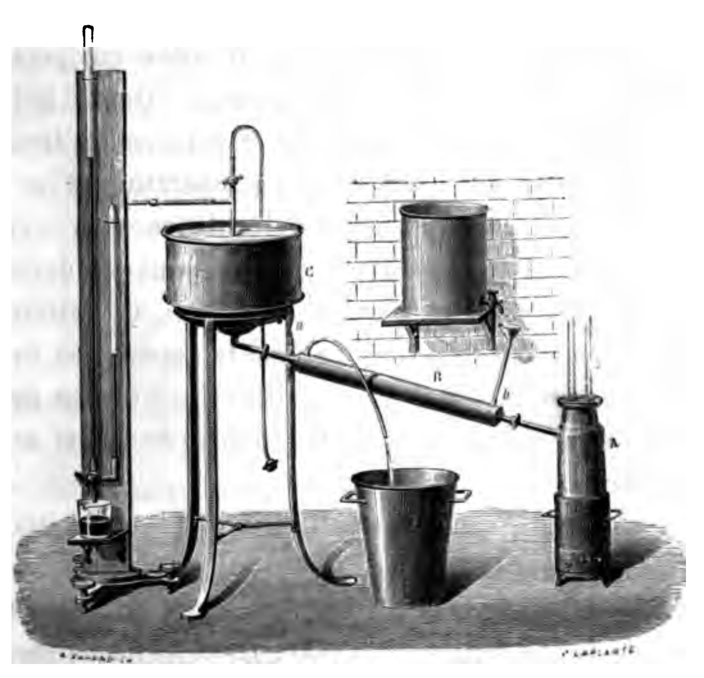


Fig. 85. — Appareil Regnault pour mesurer la tension des vapeurs aux températures supérieures à 60°.

et les appareils ont été complètement modifiés. Le principe adopté par Regnault est déduit de la loi connue de l'ébullition. D'après cette loi, la tension de la vapeur d'un liquide en ébullition est toujours précisément égale à la pression extérieure supportée par le liquide à ce moment. Dès lors, si l'on maintient le liquide dans une enceinte fermée et qu'on fasse croître ou décroître progressivement, à l'aide d'une pompe de compression ou d'une machine pneumatique, la pression exercée à la

surface du liquide, si en même temps on élève sa température jusqu'à ce qu'il entre en ébullition, la pression mesurée par un manomètre sera la valeur cherchée de la tension maximum de la vapeur, pour cette même température. La figure 85 donne la disposition des appareils. A est la chaudière en cuivre, aux parois épaisses et résistantes, où l'on fait chauffer l'eau. Un tube incliné la fait communiquer avec un réservoir C entouré d'eau froide ; ce tube est enveloppé d'un manchon B où circule constamment aussi un courant d'eau froide de *a* en *b*. Le réservoir est mis en rapport avec les pompes pneumatiques et d'autre part avec un manomètre à air libre qui permet de mesurer à tout instant la pression intérieure. Quand le liquide de la chaudière arrive à l'ébullition, les thermomètres *t* deviennent stationnaires, et l'on y lit la température. Une observation faite, on augmente la pression, les thermomètres reprennent leur mouvement ascendant, puis de nouveau deviennent stationnaires, dès que le point d'ébullition est atteint une seconde fois, et ainsi de suite. Comme la vapeur, en montant par le tube incliné, se condense aussitôt, l'eau qui en provient retombe dans la chaudière, et l'expérience peut ainsi se poursuivre indéfiniment.

Quinze ans avant que Regnault entreprît[1] ces déterminations d'une si haute importance théorique et pratique, Dulong et Arago avaient mesuré les tensions de la vapeur d'eau saturée au-dessus de la température de 100°. La description succincte de la figure 86, qui représente l'appareil employé par ces savants, donnera une idée de leurs méthodes. K est le générateur de vapeur, dont la température est mesurée par des thermomètres tels que *t* qui pénétraient à l'intérieur, protégés par des canons de fusil *a* remplis de mercure, l'un dans la vapeur, un autre dans l'eau de la chaudière. Par le tube *cbi*

1. Les expériences de Regnault datent de 1844-47. C'est en 1824 qu'une commission de l'Académie des sciences reçut du gouvernement la mission de procéder à la mesure de la force élastique de la vapeur. Dulong et Arago furent chargés par elle d'instituer les célèbres expériences que nous rappelons ici. Leur travail fut publié en 1830.

dont une partie est verticale et l'autre inclinée obliquement, la chaudière communiquait avec le réservoir en fonte *d* en partie rempli de mercure. Au-dessus du mercure et jusqu'à la partie verticale du tube, était de l'eau maintenue à une température constante par une circulation d'eau froide. Le réservoir communiquait lui-même d'un côté avec un manomètre à air comprimé, entouré d'eau froide, *m*, de l'autre avec un tube latéral en cristal *n* qui permettait d'observer extérieurement le niveau du mercure. Il est évident qu'à une température donnée,

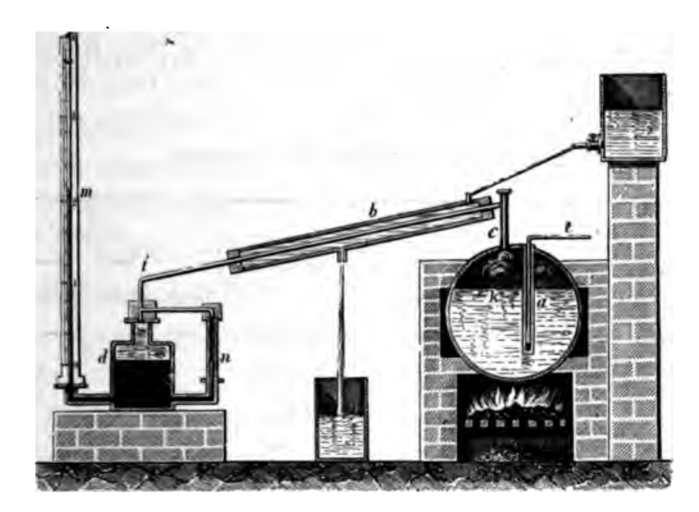


Fig. 86. — Expériences de Dulong et Arago pour la mesure des tensions de la vapeur d'eau saturée au-dessus de 100°.

indiquée par les thermomètres, la tension de la vapeur faisait équilibre à la force élastique de l'air comprimé dans le manomètre, augmentée de la différence de niveau du mercure dans le manomètre et dans le réservoir, diminuée enfin de la pression d'une colonne d'eau dont la hauteur est aisée à mesurer.

Les expériences de Dulong et Arago furent poussées jusqu'à la température de 224° ; à cette température, la force élastique de la vapeur d'eau s'élevait à 24 atmosphères.

Celles de Regnault donnèrent, avec une exactitude supérieure, due au perfectionnement des mesures et à la sûreté de sa méthode, la tension de la vapeur pour une étendue de

260 degrés de l'échelle thermométrique depuis —30° jusqu'à +230°. Ses nombreuses séries d'expériences lui permirent la construction d'une courbe dont chaque point a pour ordonnée la pression de la vapeur en millimètres et pour abscisse la température. On représente aussi la valeur de ces tensions par une formule indiquée par M. E. Roche et dont Regnault a vérifié l'exactitude sur une grande étendue de l'échelle thermométrique, et qui a le mérite de s'appliquer également aux tensions des vapeurs d'alcool et d'éther. Ici, nous nous bornerons au tableau suivant, donnant d'après Regnault, de 10° en 10°, la tension de la vapeur d'eau saturée, en millimètres et en atmosphères :

TENSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE.

TEMPÉRATURES	TENSIONS		TEMPÉRATURES	TENSIONS	
	EN MILLIMÈTRES	EN ATMOSPHÈRES		EN MILLIMÈTRES	EN ATMOSPHÈRES
	millim.	atmosph.		millim.	atmosph.
— 30°	0,386	0,0005	+ 110°	1075,37	1,415
— 20°	0,927	0,0012	120°	1491,28	1,962
— 10°	2,093	0,0027	130°	2030,28	2,671
0°	4,60	0,006	140°	2717,63	3,576
+ 10°	9,16	0,012	150°	3581,23	4,712
20°	17,39	0,023	160°	4651,62	6,120
30°	31,55	0,042	170°	5961,66	7,844
40°	54,91	0,072	180°	7546,39	9,929
50°	91,98	0,121	190°	9442,70	12,425
60°	148,79	0,196	200°	11688,96	15,380
70°	233,09	0,306	210°	14324,80	18,848
80°	354,64	0,466	220°	17390,36	22,882
90°	525,45	0,691	230°	20926,40	27,535
100°	760,00	1,000			

On vient de voir que c'est vers 230° que Regnault a limité ses expériences, et cela s'explique, quand on songe qu'à 232° la tension de la vapeur, devenue égale à 30 atmosphères, pressait la chaudière avec une telle force qu'un boulon de l'armature qui en consolidait les parois se rompit. Il fallut s'arrêter, et cette mesure de prudence était bien justifiée : à 30 atmosphères de pression, en effet, chaque décimètre carré de la

surface interne de la chaudière supportait une charge de 3100 kilogrammes.

En examinant le tableau qui précède, on verra que les accroissements de la pression varient dans une proportion bien plus rapide que ceux de la température. De 1 atmosphère, qui est la pression de la vapeur à 100°, cette pression passe à 2 atmosphères vers 121°, à 4 atmosphères à 145° environ; elle double encore à 172°, atteignant alors 8 atmosphères, et enfin vers 202° elle en vaut 16. Le calcul montre qu'à 266° la tension maximum de la vapeur d'eau saturée arriverait à l'énorme puissance de 50 atmosphères.

Tout ce que nous venons de dire se rapporte exclusivement à la vapeur d'eau. Les tensions des vapeurs saturées ont été mesurées pour un grand nombre d'autres liquides, et Regnault les a déterminées comme celles de la vapeur d'eau. Nous donnons ci-dessous quelques résultats obtenus pour des vapeurs qui ont été employées déjà, ou pourront l'être dans la suite, comme forces motrices dans les machines. Le tableau qui les renferme montre de combien il s'en faut que les vapeurs saturées de liquides différents aient, à une même température, la même tension maximum. Mais cette tension est nécessairement la même pour tous et égale à 1 atmosphère, quand la température est celle de l'ébullition à l'air libre. Or Dalton a constaté une loi qui, si elle était rigoureuse, permettrait de trouver les tensions d'une vapeur quelconque, pour une température donnée, lorsque l'on aurait celle de la vapeur d'eau pour la même température. Ce savant formulait en ces termes la loi dont nous parlons : *Toutes les vapeurs ont la même tension à une température également distante du point d'ébullition de chaque liquide.* Cela n'est point tout à fait exact, ainsi que Despretz l'a montré et que Dalton lui-même l'a reconnu[1]; mais les diffé-

1. Prenons deux exemples qui nous montreront dans quelle mesure la formule de Dalton peut être considérée comme exacte. Le sulfure de carbone a pour point d'ébullition 48°; la tension de sa vapeur saturée, à 60° et à 20°, est respectivement égale, d'après le tableau ci-après, à 1164mm,51 et à 298mm,03. L'une de ces températures dépasse de 12° son point d'ébullition; l'autre est de 28° au-dessous. Il faut donc, pour vérifier la loi de

rences entre le calcul, basé sur la loi en question, et les résultats de l'expérience sont minimes lorsque les températures s'éloignent peu de celle de l'ébullition.

TENSIONS DES VAPEURS SATURÉES DE DIVERS LIQUIDES EN MILLIMÈTRES DE MERCURE.

TEMPÉRATURES	ÉTHER	ALCOOL	ACÉTONE	CHLOROFORME	CHLORURE DE CARBONE	SULFURE DE CARBONE
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
0°	184,39	12,70	63,33	59,72	32,95	127,91
20°	432,78	44,46	180,08	160,47	90,99	298,03
40°	907,04	133,69	419,35	369,26	214,81	617,53
60°	1725,01	350,21	860,96	755,44	447,43	1164,51
80°	3022,79	812,91	1611,05	1407,64	843,29	2032,53
100°	4953,30	1697,55	2796,20	2428,54	1467,09	3325,15
120°	7719,20	3231,73	4552,95	3925,74	2393,67	5148,79
140°	»	5674,59	7007,64	6000,16	3709,04	7603,96
160°	»	»	»	8734,20	5513,14	»

§ 3. FORMATION DES VAPEURS DANS L'AIR ET DANS LES GAZ. — LOI DU MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

Tout le monde sait que l'eau et tous les liquides vaporisables émettent des vapeurs, soit à l'air libre dans un espace illimité, soit dans un espace clos et rempli d'air. Au dernier siècle, avant les expériences de Dalton, on croyait même à la nécessité de la présence de l'air pour déterminer l'évaporation; on lui attribuait la propriété d'un dissolvant du liquide. En

Dalton, prendre la tension de la vapeur d'eau à 112° et à 72°; on trouve les nombres 1150mm et 257mm. Ces nombres, bien que voisins des premiers, en diffèrent notablement toutefois. Autre exemple : L'alcool bout à 78°,3. Aux températures de 60° et de 100°, l'une inférieure de 18°,3, l'autre supérieure de 21°,7 au point d'ébullition, les tensions de sa vapeur sont respectivement égales à 350mm,21 et à 1697mm,55. Celles de la vapeur d'eau à 81°,7 et à 121°,7, points également distants relativement à la température d'ébullition 100°, sont 380mm et 1550mm environ. Si l'on eût pris 80° et 70°, c'est-à-dire 1°,7 au-dessus et 8°,3 au-dessous de l'ébullition, les tensions auraient été 812,91 et 541,15. Pour la vapeur d'eau à 101°,7 et à 91°,7, les tensions sont environ 811 et 557. Les différences diminuent donc quand on s'écarte moins de part et d'autre des points d'ébullition. Ainsi la loi énoncée par Dalton ne comporte qu'une approximation assez éloignée des déterminations expérimentales.

réalité, quand un liquide, au lieu d'être dans le vide, est dans un espace renfermant de l'air ou tout autre gaz, l'évaporation, plus lente que dans le vide, se fait suivant les mêmes lois. Si l'espace est illimité, si l'air y est en repos, la vapeur se formera assez rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement, parce que les couches en contact avec le liquide approcheront de plus en plus de la saturation, c'est-à-dire du moment où l'évaporation cessera. Si l'air ou le gaz surmontant le liquide se renouvelle, la formation de la vapeur se fera avec plus de rapidité, parce qu'elle sera entraînée à mesure qu'elle se formera. Nous avons journellement des exemples de ces phénomènes, qui jouent, ainsi que nous le verrons plus tard, un si grand rôle dans la météorologie atmosphérique. Le sol détrempé par la pluie se sèche très vite par le vent, quand l'air est d'ailleurs éloigné de son point de saturation. Le linge mouillé étendu en plein air — les blanchisseuses et les ménagères le savent bien — est bien plus rapidement séché quand il règne une brise un peu forte, si d'ailleurs la direction de cette brise est celle des vents secs de la région, c'est-à-dire si l'air n'est pas préalablement saturé de vapeur.

Dans un espace limité et rempli de gaz, la tension maximum de la vapeur saturée d'un liquide quelconque est précisément égale à celle de la même vapeur dans le vide. Cette loi, dont la découverte est due à Dalton, se vérifie expérimentalement à l'aide d'un appareil analogue à ceux que nous avons déjà décrits. La disposition spéciale relative au mélange du gaz et de la vapeur est due à Gay-Lussac, et se trouve représentée dans la figure 87. C'est un manomètre à air libre composé de deux tubes, dont l'un, de plus gros diamètre que l'autre, est muni, à sa partie supérieure, d'une monture à robinet *r*, et à sa partie inférieure, d'un second robinet *r'* servant à l'écoulement du mercure. On le remplit de mercure bien sec, puis on visse sur la monture supérieure un ballon renversé plein du gaz également sec et muni aussi d'un robinet. On ouvre alors les trois robinets : le mercure s'écoule par celui du bas

et une certaine quantité de gaz passe du ballon dans le gros tube. Lorsque cette quantité semble suffisante, on ferme les communications, et l'on verse du mercure dans le petit tube ouvert jusqu'à ce que, comme le montre la figure 87, il soit également de niveau dans les deux branches de l'appareil : à ce moment, la pression du gaz est précisément égale à la pression extérieure ou atmosphérique. Cette première partie de l'opération terminée, on enlève le ballon, et on le remplace par un petit entonnoir A dont le robinet est percé seulement d'une petite cavité à sa surface. On remplit l'entonnoir du liquide à vaporiser, et la cavité tournée vers le fond s'emplit; on imprime une demi-révolution au robinet et la cavité se présentant en face du tube laisse tomber dans l'espace occupé par le gaz une goutte du liquide. En répétant cette manœuvre plusieurs fois, on finit par saturer l'espace de la vapeur formée, ce que l'on reconnaît quand le mercure cesse de baisser dans le tube, même en présence d'un excès de liquide. Le volume intérieur du gaz augmente ainsi, mais on le ramène à ce qu'il était précédemment en introduisant du mercure dans la branche ouverte du manomètre jusqu'à ce que le niveau reprenne dans le gros tube la hauteur qu'il avait avant l'introduction du liquide. Il est évident qu'alors l'élévation de niveau du mercure de la branche ouverte mesure précisément la tension de la vapeur saturée du liquide, dans l'espace de volume invariable occupé par le gaz. Or l'expérience montre que cette tension est égale à celle de la vapeur dans le vide pour la même température.

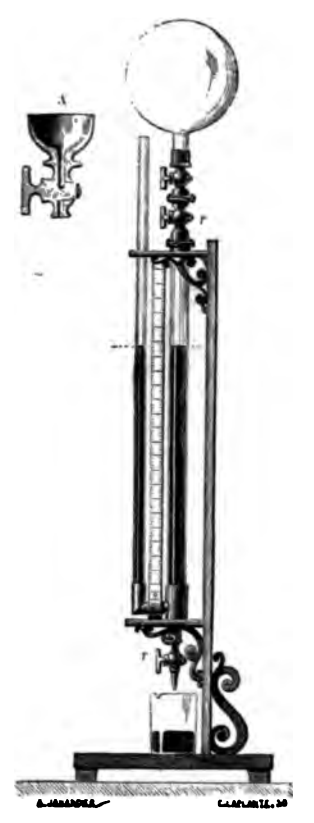


Fig. 87. — Appareil de Gay-Lussac pour vérifier la loi du mélange des gaz et des vapeurs.

Cette loi n'est pas cependant rigoureusement exacte, et les expériences très précises de Regnault ont montré que la tension des vapeurs est toujours un peu plus faible dans les gaz que dans le vide. Par exemple, la tension de la vapeur d'eau saturée pour la température de 15° est $12^{mm},70$ dans le vide, et seulement $12^{mm},38$ dans l'air ; à 38°, elle est $49^{mm},30$ dans le vide et $48^{mm},70$ dans l'air ; à 40°, elle est $54^{mm},4$ dans le vide et seulement $53^{mm},7$ dans l'azote. Toutefois on considère comme négligeables ces faibles différences.

La loi du mélange des gaz et des vapeurs, telle que nous venons de l'exposer, n'est pas seulement vraie pour une vapeur unique; elle l'est encore pour plusieurs vapeurs provenant de liquides de différentes natures, à la condition toutefois qu'elles n'exercent pas d'action chimique les unes sur les autres. En un mot, les gaz et les vapeurs mélangés dans un même espace ont une tension totale qui est égale à la somme de celles qu'ils y acquerraient séparément.

§ 4. ÉBULLITION DES LIQUIDES. — VAPORISATION.

De tout ce qui précède, il résulte que l'eau, comme tous les liquides, se réduit spontanément en vapeur à toute température, et que la tension de la vapeur saturée, soit dans le vide, soit dans un espace clos renfermant un autre gaz, va en croissant avec la température, avec une intensité et suivant une progression qui varient d'un liquide à l'autre.

Aux températures ordinaires, la transformation de l'eau en vapeur par *évaporation* n'a lieu qu'à la surface; aucune bulle gazeuse ne se dégage de la masse interne ; on reconnaît seulement que le phénomène est d'autant plus rapide, que la surface liquide est relativement plus étendue, et que la température est elle-même plus élevée. Mais il faut ajouter que cette rapidité dépend encore, et de l'état hygrométrique de l'air ambiant, et de la pression atmosphérique pendant la durée de l'expérience.

Voyons maintenant ce qui se passe quand, par l'élévation croissante de la température, on arrive au phénomène connu sous le nom d'*ébullition*. Prenons encore l'eau pour exemple.

Mettons sur le feu le vase contenant l'eau et échauffons-la ainsi progressivement. Si le foyer est suffisamment actif, on verra bientôt la vapeur se former, non seulement à la surface du vase, d'où elle s'échappe en se condensant sous forme de nuages qui s'élèvent et se dissipent dans l'air, mais encore au sein du liquide même. Sur le fond et sur les parois inférieures du vase, celles qui sont en contact direct avec les charbons ardents, des bulles gazeuses apparaissent, se détachent, puis s'élèvent en forme de cônes jusqu'aux couches supérieures de l'eau. Ces premières bulles de vapeur diminuent de volume en s'élevant, et disparaissent avant d'avoir atteint le niveau supérieur du liquide. On entend alors un bruissement particulier causé précisément par la condensation de toutes ces bulles, ou mieux par le mouvement brusque de l'eau qui se précipite dans chacun des petits vides occasionnés par la condensation. C'est ce qu'on exprime communément en disant que *l'eau chante*.



Fig. 88. — Première phase de l'ébullition : l'eau chante.

En ce moment l'eau ne bout pas encore ; en d'autres termes, la surface liquide extérieure reste calme, unie et horizontale. L'agitation provenant de la formation active de la vapeur est restreinte aux couches inférieures ; elle n'atteint pas encore les couches les plus élevées. C'est que l'élévation de la température n'est pas uniforme ; mais les courants provoqués dans la masse par l'ascension de l'eau la plus chaude et dès lors la plus légère, la chaleur abandonnée par les bulles qui se condensent sans interruption, vont bientôt rendre le phénomène

général. Les bulles de vapeur qui tout à l'heure disparaissaient avant d'atteindre la surface, montent jusqu'à celle-ci et, en crevant, rompent l'équilibre : le bouillonnement se manifeste dans la masse entière. Le phénomène de l'ébullition est maintenant complet.

Insistons maintenant sur les lois du phénomène. Elles sont relatives, d'une part à la température du point d'ébullition, d'autre part à la tension de la vapeur qui se dégage par le fait du changement d'état.



Fig. 89. — Égalité de la pression extérieure et de la tension de la vapeur.

Une première loi, que Dalton a reconnue expérimentalement, à l'aide de l'appareil de la figure 82, s'énonce ainsi :

La force élastique d'une vapeur pendant l'ébullition reste constamment égale à la pression extérieure supportée par la surface du liquide au moment de l'expérience. Si le liquide bout à l'air libre, c'est donc la pression barométrique qui mesure la tension de sa vapeur. Nous dirons plus loin les conséquences de cette première loi.

On la vérifie encore en simplifiant, comme le montre la figure 89, l'appareil de Dalton. Un tube recourbé A renferme du mercure qui remplit sa branche la plus courte, sauf l'espace occupé par une petite quantité d'eau. On adapte le tube au col d'un ballon, à demi plein d'eau, qu'on fait bouillir. L'eau qui surmonte le mercure se réduit elle-même en vapeur (avec excès de liquide, si l'on a mis une quantité d'eau suffisante). On voit alors le mercure descendre dans la courte branche et monter dans l'autre, de façon à avoir exactement même niveau

dans chacune d'elles. Comme dans la grande branche ouverte, c'est la pression atmosphérique qui agit; on voit qu'elle est précisément égale à la force élastique de la vapeur à la température de l'ébullition.

La seconde loi consiste en ce que *la température d'ébullition est fixe, pour chaque liquide, pour une pression extérieure donnée, et reste constante pendant toute la durée du phénomène*[1]. On nomme spécialement *point d'ébullition* la température d'un liquide qui bout sous la pression normale de 760 millimètres. Nous retrouvons là une loi qui a été reconnue également vraie pour les autres changements d'état des corps, la fusion et la solidification. Il en résulte qu'un liquide soumis à un foyer de chaleur s'échauffe bien de plus en plus avant que le point d'ébullition soit atteint, mais qu'arrivé à ce point, il cesse de s'échauffer, quelle que soit d'ailleurs l'intensité de la chaleur du foyer. En activant ce dernier, on ne fait que rendre la vaporisation plus prompte, mais la température du liquide ou celle de sa vapeur



Fig. 90. — Démonstration de la seconde loi de l'ébullition. Appareil de Dalton.

1. Cette loi fondamentale du phénomène de l'ébullition peut encore s'énoncer ainsi : « La température d'ébullition d'un liquide est celle pour laquelle la tension maximum de sa vapeur est précisément égale à la pression que le liquide supporte. Dulong la démontrait expérimentalement à l'aide de l'appareil que représente la figure 90, et qui est, pour ainsi dire, l'expérience renversée de Regnault dans sa mesure de la tension des vapeurs pour les températures élevées. Le tube incliné où la vapeur formée dans la cornue vient se condenser, communique à un ballon plein d'air en relation avec un manomètre. Quelle que fût la valeur de la pression accusée par le manomètre, cette pression était toujours exactement égale à la tension maximum de la vapeur correspondant à la température marquée par le thermomètre.

reste constante. Ainsi se trouve justifié le choix du point d'ébullition de l'eau, sous la pression de 760 millimètres, comme second point fixe de l'échelle thermométrique.

Une conséquence importante de la constance de la température pendant toute la durée du phénomène de l'ébullition, c'est que la chaleur fournie par le foyer aux liquides pour ce changement d'état, est entièrement absorbée par la vapeur à mesure qu'elle se forme. C'est ce qu'on nomme *chaleur latente de vaporisation*, chaleur qui, nous le verrons bientôt, redevient libre ou sensible dans le passage inverse de la vapeur à l'état liquide.

TABLEAU DES POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES LIQUIDES SOUS LA PRESSION NORMALE DE 760 MILLIMÈTRES.

LIQUIDES	TEMPÉRATURES	LIQUIDES	TEMPÉRATURES
Protoxyde d'azote	— 88°	Chlorhydrate d'ammoniaque (solution saturée)	+ 114°,2
Acide carbonique	— 78°	Bichlorure d'étain	115°,4
Chlore liquide	— 40°	Acide acétique concentré	120°
Ammoniaque anhydre	— 35°	Acide azotique (4 équiv. d'eau)	123°
Cyanogène	— 18°	Carbonate de potasse (solution saturée)	135°
Acide sulfureux	— 10°	Essence de térébenthine	156°,8
Éther chlorhydrique	+ 11°	Potasse caustique (solution saturée)	175°
Aldéhyde	20°,8	Iode	176°
Acide hypoazotique	25°	Iodure d'argent	176°
Acide cyanhydrique	26°,2	Chlorure de calcium (solution saturée)	179°,5
Acide sulfurique anhydre	32°	Éther oxalique	183°
Éther sulfurique	35°,5	Créosote	203°
Sulfure de carbone	48°	Camphre du Japon	205°
Chloroforme	60°,8	Naphtaline	210°
Brome	63°	Camphre de Bornéo	215°
Éther acétique	74°,1	Phosphore	290°
Alcool absolu	78°,3	Acide sulfurique monohydraté	326°
Benzine	80°,8	Mercure	350°
Acide azotique monohydrique	86°	Paraffine	370°
Éther sulfhydrique	91°	Huile de lin	387°,5
Eau distillée	100°	Soufre	440°
Sulfate de soude (solution saturée)	103°	Sélénium	650°
Eau de mer	103°,7	Sodium	700°
Carbonate de soude (solution saturée)	104°,6	Cadmium	860°
Pétrole	106°	Zinc	1300°
Chlorure de sodium (solution saturée)	108°,4		

§ 5. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION.

On vient de voir que la tension de la vapeur d'un liquide en ébullition est égale à la pression extérieure, ou plus généralement à la pression que supporte la surface du liquide; nous savons d'autre part que la tension varie, pour un même liquide, avec la température et croît à mesure que celle-ci est plus élevée. La conséquence à tirer de ces deux lois, c'est que la température d'ébullition d'un liquide doit varier elle-même avec la pression, s'accroître si la pression augmente, diminuer quand la pression diminue. L'expérience confirme complètement l'exactitude de cette conséquence; mais, avant de donner des exemples des variations du point d'ébullition, revenons au phénomène lui-même, et aux circonstances qui l'accompagnent.

Nous avons vu plus haut, en examinant ce qui se passe dans un vase rempli d'eau qu'on chauffe progressivement jusqu'à l'ébullition complète du liquide, que les premières bulles de vapeur qui se forment au fond du vase, ne montent pas tout d'abord jusqu'à la surface. La force élastique en vertu de laquelle elles se dégagent de ce fond, doit être assez grande pour surmonter la pression que supportent les couches inférieures du liquide, pression qui se compose de deux éléments, savoir : d'une part la pression de l'eau, d'autre part la pression atmosphérique, si le vase est chauffé à l'air libre. Or la force élastique de la vapeur augmente avec la température.

A l'origine, quand se forment au fond du vase les premières bulles de vapeur, c'est que la tension de ces bulles est d'abord assez forte pour faire équilibre à cette double pression; une fois formées, elles s'élèvent à cause de leur légèreté spécifique; mais comme les couches d'eau qu'elles traversent n'ont pas toutes encore la même température, que les plus élevées sont momentanément plus froides, les bulles se refroidissent en

montant, elles se condensent sous l'influence de ce refroidissement, diminuent de grosseur et finalement s'évanouissent. C'est ce qui explique pourquoi elles repassent entièrement à l'état liquide avant d'avoir pu atteindre le niveau de l'eau dans le vase.

Peu à peu cependant, l'eau s'échauffe partout, soit par le mélange provenant des courants liquides ascendants et descendants, soit par la chaleur que lui cèdent en se condensant les bulles de vapeur, et à la fin la tension de ces dernières est assez forte pour qu'elles puissent conserver leur état en faisant leur ascension complète. On les voit apparaître à la surface de l'eau enveloppées de minces couches d'eau hémisphériques. En cet état elles n'ont plus à supporter que la pression de l'atmosphère; elles crèvent alors, provoquant de la sorte à la surface un mouvement tumultueux, indice visible de l'ébullition proprement dite (fig. 91). Il est donc bien évident que la tension de la vapeur est en ce moment précisément égale à la pression extérieure, à la pression atmosphérique, si le vase est ouvert et que l'ébullition se fasse à l'air libre. Le raisonnement ne fait que confirmer là ce que l'expérience nous avait déjà démontré.



Fig. 91. — Phase de l'ébullition complète ; les bulles crèvent à la surface.

Arrivons maintenant aux faits qui prouvent que la température du point d'ébullition d'un liquide diminue quand la pression extérieure diminue.

Prenons un ballon à moitié plein d'eau à une température inférieure à celle de l'ébullition à l'air libre (fig. 92). Par la tubulure à robinet dont il est muni, mettons-le en communication avec la machine pneumatique; puis faisons le vide. A mesure que l'air contenu dans le ballon est enlevé, la pression

que cet air exerçait à la surface du liquide diminue. Quand la raréfaction est suffisante, on voit l'eau bouillir; seulement les bulles de vapeur, au lieu de partir du fond du vase, comme il arrivait dans notre première expérience, prennent naissance dans les couches supérieures, parce que c'est dans ces couches que la pression est plus faible. Du reste, l'ébullition s'arrête bientôt; cela tient à ce que la vapeur formée, en s'accumulant, presse elle-même la surface de l'eau. En continuant alors de faire le vide, on voit recommencer l'ébullition. En faisant un vide aussi complet que possible, on pourrait faire bouillir de l'eau sans que sa température dépassât beaucoup 0°, température de la glace fondante.



Fig. 92. — Ébullition de l'eau dans le vide.

Voici une autre expérience qui met en évidence d'une façon très simple le même fait de l'ébullition de l'eau dans le vide, à une température de beaucoup inférieure à 100°. Elle est due à Franklin. De l'eau, contenue dans un ballon à long col, est d'abord soumise à l'air libre, et sur un foyer ardent, à une ébullition assez prolongée pour que l'air du ballon soit chassé par la vapeur qui s'échappe. On bouche alors le flacon, qu'on retire du feu, et, pour éviter la rentrée de l'air, on le renverse, le col plongé dans l'eau. Si alors on refroidit le ballon, en l'aspergeant d'eau froide (fig. 93), ou en le couvrant de morceaux de glace, la vapeur intérieure se condense; le vide qui se forme détermine une diminution de pression, et l'ébullition recommence. Il semble ainsi qu'on fasse *bouillir de l'eau en la refroidissant*.

Cette expérience nous instruit aussi d'un fait d'une haute importance : c'est qu'un abaissement de température ramène la vapeur, en partie du moins, à l'état liquide, en d'autres termes la condense. Nous reviendrons plus amplement tout à l'heure sur ce phénomène, inverse de celui de l'évaporation ou de la vaporisation.

Enfin, il y a un autre moyen de faire bouillir l'eau à une température moins élevée que 100° : c'est de s'élever en des points du sol où la pression atmosphérique soit inférieure à 760 millimètres. Et, en effet, l'expérience prouve que sur les montagnes l'eau bout à moins de 100°. De Saussure a trouvé 86° pour la température de l'ébullition de l'eau au sommet du mont Blanc : la hauteur du baromètre n'était alors que de 434 millimètres. Bravais et Martins ont fait des expériences semblables aux Grands Mulets, sur les flancs du même mont : l'eau bouillait à 90° sous une pression de 529 millimètres. Ils ont trouvé pour la température de l'ébullition au sommet du mont Blanc 84°,4 pour une pression barométrique de 424 millimètres. Au sommet du mont Rose, Tyndall a trouvé que l'eau bouillait à 84°,95. A Mexico, la température de l'ébullition est de 92°. A Paris, au premier étage de l'Observatoire, à l'altitude de 65 mètres au-dessus du niveau de la mer, l'eau bout à 99°,7. En un mot, le point d'ébullition va en s'élevant quand l'altitude décroît. Comme d'ailleurs, en chaque point d'une altitude donnée, la pression du baromètre est variable, il en est de même du point d'ébullition. Ainsi, l'ébullition de l'eau n'est

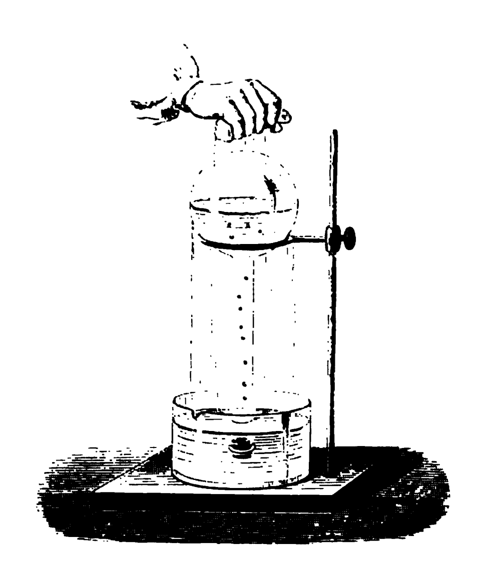


Fig. 93. — Ébullition de l'eau par le refroidissement.

pas nécessairement une preuve de la grande élévation de sa température, puisque la température du point d'ébullition s'abaisse en même temps que la pression extérieure. Dans les pays dont l'altitude est considérable, l'eau bouillante ne permettrait que difficilement, imparfaitement, certaines opérations culinaires. « A Londres, dit Tyndall, on assure que, pour faire du thé parfait, l'eau bouillante (à 100°) est absolument nécessaire. S'il en est ainsi, on ne pourrait pas se procurer cette boisson dans toute son excellence aux stations les plus élevées des Alpes. »

On conçoit dès lors que, si, au lieu de diminuer la pression supportée par la surface du liquide, on augmente cette pression de manière à lui faire dépasser la valeur de 760 millimètres, l'ébullition en sera d'autant plus retardée que la pression sera elle-même plus forte. Dans ces conditions, l'eau bout à des températures qui peuvent être de beaucoup supérieures à 100°. Un moyen très simple d'accroître cette pression consiste à employer la vapeur elle-même, ou la force élastique dont elle est douée. C'est à Papin, à l'immortel inventeur de la machine à vapeur, qu'on doit la découverte de ce moyen de chauffer l'eau au delà de 100°; la marmite connue aujourd'hui sous son nom, et dont il publia la description à Londres, en 1681, sous le titre de *New Digester*[1], fournit une excellente démonstration expérimentale de l'influence de la pression sur l'élévation du point d'ébullition d'un liquide.

Voici en quoi consiste la marmite de Papin :

Un vase cylindrique, en fer ou en bronze, aux parois épaisses et résistantes, est fermé par un couvercle de même métal, qu'une vis de pression maintient appuyé contre les bords du vase. Celui-ci étant empli d'eau aux deux tiers, par exemple,

1. La traduction française du *New Digester* a été publiée à Paris en 1682, sous le titre : *La manière d'amollir les os et de faire cuire toutes sortes de viandes en fort peu de temps et à peu de frais, avec une Description de la machine dont il faut se servir à cet effet, ses propriétés et ses usages confirmés par plusieurs expériences, nouvellement inventée par M. Papin, docteur en médecine;* chez Estienne Michallet, rue Saint-Jacques. Paris, 1682, un petit volume in-12 de 175 pages. (*Histoire des machines à vapeur*, par M. Hachette.)

et placé sur un foyer incandescent, de la vapeur se forme en quantité croissante; mais comme elle n'a pas d'issue, elle s'accumule au-dessus du liquide, sur la surface duquel elle exerce une pression de plus en plus grande. L'eau peut ainsi atteindre, sans bouillir, une température dépassant de beaucoup 100°, capable, par exemple, de faire fondre certains métaux, de l'étain, du bismuth, du plomb[1]. Les légumes, la viande y cuisent plus rapidement que dans l'eau bouillante ordinaire : les substances susceptibles de se dissoudre, comme la gélatine des os, se ramollissent et se dissolvent très aisément. On a obtenu ainsi de la gélatine, en soumettant à l'action de cette eau surchauffée des os fossiles, ayant appartenu à des mastodontes et autres animaux antédiluviens vivant il y a quelques milliers de siècles.



Fig. 94. — Marmite de Papin ou *Nouveau Digesteur*.

La pression de la vapeur peut, dans certaines conditions, atteindre une force considérable, qui, s'exerçant à la fois sur la surface liquide et sur les parois du vase, risquerait de le faire éclater et rendrait dès lors l'expérience dangereuse. C'est pourquoi la marmite est munie d'une soupape de sûreté. Un trou est percé dans le couvercle, et sur la pièce mobile qui ferme ce trou s'appuie un levier dont la grande branche supporte un poids qu'on peut placer à une distance variable, suivant la pression limite qu'on ne veut pas dépasser. Si la température de l'eau qui correspond à cette limite est franchie, la vapeur

1. Nous avons vu (tableau de la page 161) que l'étain fond à 235°, le bismuth à 265°, et le plomb à 335° centigrades.

soulève le levier, s'échappe en sifflant au dehors, où elle se condense sous l'apparence d'un nuage; la pression intérieure diminue par le fait de cette projection de vapeur et tout danger d'explosion se trouve conjuré. Nous verrons la *soupape de sûreté*, telle que l'a imaginée Papin, employée encore aujourd'hui dans tous les générateurs de vapeur.

§ 6. INFLUENCES DIVERSES SUR LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION DES LIQUIDES.

La variation de la pression extérieure n'est pas la seule circonstance qui influe sur la température d'ébullition des liquides. La nature de la matière qui forme les vases où on les chauffe, l'état de la surface de ces vases, les substances dissoutes ou en combinaison dans ces liquides, ont une influence quelquefois considérable sur cette température.

Gay-Lussac a le premier constaté l'influence des vases, et reconnu que l'eau entre en ébullition dans un vase de verre à une température plus élevée que dans un vase métallique. En 1842, Marcet a fait sur ce point des expériences intéressantes. Résumons les unes et les autres.

Dans un vase de métal, l'ébullition est régulière et continue; les bulles qui prennent naissance sur les parois chauffées, sont petites et nombreuses, et la température du liquide comme celle de sa vapeur est 100°.

Dans un vase en verre dont la surface intérieure a été préalablement bien nettoyée, la formation des bulles gazeuses est plus lente; ces bulles sont grosses, peu nombreuses : on dirait qu'elles ont peine à se détacher du fond du vase. Fait-on bouillir l'eau dans un vase métallique, on voit les bulles plus petites, mais beaucoup plus nombreuses, partir de tous les points de la paroi inférieure, et, comme indice caractéristique de cette formation plus aisée de la vapeur, on trouve que le point d'ébullition est moins élevé que dans le verre : la différence peut s'élever de 1 à 2 degrés. Ce dernier point est

facile à constater. Prenons un vase en verre renfermant de l'eau dont l'ébullition a cessé il y a peu d'instants, c'est-à-dire dont la température a légèrement baissé : projetons-y de la limaille métallique. Voici l'ébullition qui recommence; et ce qui montre bien quelle est l'influence de la nature de la substance, c'est que du verre en poudre projeté de la même manière produit moins d'effet que la limaille métallique. Dans un vase en verre, en verre *vert* notamment, dont la surface interne n'a pas été préalablement bien nettoyée, les poussières qui tapissent le fond provoquent la formation de la vapeur, tout comme il arrive quand on y jette des parcelles de limaille.

D'après Marcet, le point d'ébullition de l'eau distillée, dans des ballons de verre, varie entre 100° et 102°, selon la qualité du verre que l'on emploie; de plus, la température de la vapeur qui, elle, reste sensiblement la même, est néanmoins constamment inférieure de quelques centièmes de degré à la température de 100° ou de l'eau qui bout dans un vase métallique.

Si la surface intérieure du vase (qui alors peut être indifféremment en métal ou en verre) a été recouverte d'un vernis de soufre, de gomme laque, la température d'ébullition est, au contraire, inférieure à 100° et égale à 99°,75 ou 99°,80. Dans ce cas, la vapeur est à la même température que le liquide bouillant. Mais si l'on prend un vase en verre où a séjourné pendant quelques heures de l'acide sulfurique concentré, puis qu'on le lave à plusieurs reprises à l'eau bouillante, l'eau distillée qu'on y fait chauffer peut être portée à 105° et même 106° sans bouillir. A 100°, quelques grosses bulles de vapeur se détachent bien du fond du vase, mais sans que le thermomètre cesse de monter, après avoir baissé toutefois de quelques dixièmes de degré à chaque bouffée de vapeur. La potasse concentrée produit le même effet que l'acide sulfurique. Enfin, on observe un retard semblable dans l'ébullition d'autres liquides, de l'alcool par exemple.

Quelle est la raison de ces différences?

Qu'est-ce qui, dans le verre, plutôt que dans le métal, s'oppose à la formation des bulles de vapeur?

Il y a là probablement une action moléculaire, l'adhérence des molécules liquides qui, très considérable pour le verre, est bien moindre pour une surface métallique. Le changement d'état, le passage de l'état liquide à l'état gazeux, éprouve, pour se produire dans le premier cas, une résistance plus grande que dans le second. Quand une première bulle a réussi à se former au contact du verre, elle augmente de volume pour deux motifs : par accroissement de température d'abord, ensuite par la formation de nouvelle vapeur sur la surface sphérique interne de la bulle. La tension de la vapeur devenant tout à coup plus forte que la pression subie, il en résulte les soubresauts que l'on remarque alors, quelquefois même la projection violente d'une portion de liquide hors du vase.

Ce n'est pas seulement l'adhérence de l'eau pour le verre que doit vaincre une molécule d'eau chauffée à 100° pour se convertir en bulles de vapeur, c'est encore la cohésion, la force qui unit cette molécule à toutes les molécules qui l'entourent. Cette cohésion est d'autant plus grande que l'eau est plus pure et surtout qu'elle est mieux purgée d'air. L'air en dissolution dans l'eau semble jouer le rôle d'un diviseur qui a préparé les molécules liquides à la séparation. Et de fait, l'expérience confirme cette manière de voir.

Le physicien Deluc ayant enfermé dans un matras à long col de l'eau purgée d'air, put la porter à une température de 112° sans qu'elle entrât en ébullition. Plus tard, un grand nombre d'expériences décisives dues à M. Donny ont mis en évidence cette action de l'air dissous dans l'eau sur l'ébullition du liquide. Voici l'une de ces expériences :

Un tube doublement recourbé et terminé à l'une de ses extrémités en forme de boule (fig. 95) renferme de l'eau complètement purgée d'air. Cette condition essentielle a été obtenue en faisant bouillir l'eau dans le tube encore ouvert; la vapeur qui se dégage chasse peu à peu l'air du tube ainsi que celui

qui était dissous dans l'eau ; on ferme à la lampe dès qu'on est assuré qu'il n'y a plus dans le tube que de l'eau et sa vapeur. On a ainsi une sorte de marteau d'eau, dont on plonge la partie recourbée contenant le liquide refroidi dans un bain d'huile. On chauffe ce dernier à l'aide d'une lampe à alcool, et l'on constate alors par le thermomètre que la température peut être portée à plus de 130°, sans que l'ébullition se produise. A la température de 138°, la vapeur se forme tout à coup et si brusquement, que l'eau du tube est projetée à l'extrémité située hors du bain. Le choc qui en résulte est amorti par les boules ; il peut arriver cependant que l'appareil éclate avec explosion.



Fig. 95. — Expérience de Donny sur l'ébullition de l'eau purgée d'air.

Les circonstances dans lesquelles la vapeur se produit brusquement, d'une façon irrégulière et en quantités plus considérables que dans les conditions ordinaires ou normales, méritent un examen spécial, parce qu'elles peuvent se rencontrer dans les chaudières de machines à vapeur et donner lieu à de graves accidents, à des explosions dangereuses.

On doit à M. L. Dufour de curieuses expériences qui montrent que le retard de l'ébullition n'a pas toujours pour cause l'adhésion du liquide pour la matière du vase ni l'absence d'air en dissolution. Ce savant introduisait dans un bain formé d'essence de girofle additionnée d'une petite quantité d'huile

des gouttes d'eau qui se maintenaient en équilibre, sous la forme de sphères parfaites et librement mobiles à l'intérieur du bain. En chauffant ce dernier avec précaution, il a pu dépasser de beaucoup 100° sans qu'il y eût ébullition de l'eau. « On arrive facilement et habituellement, dit-il, à 120°, 130° et au delà. J'ai maintes fois eu des sphères aqueuses, de 10 millimètres de diamètre, à 140° et 150°. Des sphères plus petites, de 1 à 2 millimètres de diamètre, ont été plusieurs fois amenées à 170° et même 175°, c'est-à-dire à des températures où la force élastique de la vapeur d'eau est de plus de 8 atmosphères. Il s'agit ici d'eau qui n'a subi aucune préparation; elle n'est ni distillée, ni purgée d'air. » M. Dufour a obtenu des phénomènes tout semblables avec d'autres liquides : le chloroforme, qui bout à 61°, a pu être porté à 90° et à 100°.

Il y a une évidente analogie entre ces phénomènes des liquides *surchauffés* et ceux que nous avons décrits plus haut en traitant de la surfusion et des dissolutions sursaturées. Ainsi, le contact d'un corps solide avec les sphères liquides en suspension dans le bain de M. Dufour amène brusquement la vaporisation de ces sphères. Il est probable que là encore c'est l'influence de l'air qui provoque la vaporisation : le corps solide mis en contact avec la bulle liquide retient toujours à sa surface une mince couche de ce fluide. Dès que cette sorte d'atmosphère gazeuse vient à toucher un point de la surface du liquide, elle permet à l'évaporation de commencer en ce point, et la haute température la fait propager aussitôt dans la masse tout entière.

Dans tout ce qu'on vient de voir, il n'a été question que de liquides ne renfermant point de matières étrangères. Voyons quel genre d'influence est particulier à la nature des substances introduites dans les liquides soumis à l'ébullition.

L'expérience montre que les substances simplement mélangées ou en suspension dans l'eau ne modifient pas la température d'ébullition. Il n'en est plus de même quand ces substances sont combinées ou en dissolution.

Le liquide dissous, l'alcool par exemple, est-il plus volatil que l'eau, en ce cas le point d'ébullition s'abaisse ; il s'élève, au contraire, si c'est un liquide dont la vapeur se forme moins facilement, comme l'acide sulfurique. Mais la vapeur produite n'est plus de la vapeur d'eau : c'est un mélange ou une combinaison des vapeurs de chaque liquide.

Enfin, quand la substance dissoute dans l'eau est un sel, la température du point d'ébullition est toujours plus élevée que celle de l'eau pure, et cette élévation est d'autant plus grande que la proportion du sel en dissolution est plus forte elle-même. C'est ainsi qu'une dissolution de sel marin bout :

A 101°,5,	si la proportion est de	10	pour 100.
A 102°,5,	—	20	—
A 105°,5,	—	30	—
A 108°,0,	—	40	—

Aussi qu'arrive-t-il quand on porte une dissolution saline à l'ébullition ? C'est que l'évaporation la concentre. Quand l'ébullition est obtenue, la vapeur d'eau se formant en grande quantité, la proportion relative du sel qui reste dissous augmente, la température monte progressivement, jusqu'à ce que, la dissolution ayant atteint son maximum de concentration, ou étant, comme on dit, *saturée*, la température d'ébullition à ce moment devienne fixe, comme celle de l'ébullition de l'eau pure, mais toujours plus élevée qu'elle.

Une dissolution de sel marin est saturée quand la quantité en poids de sel dissous dans 100 parties d'eau est 41,2 ; le point fixe d'ébullition est alors 108°,4. La dissolution saturée de sel ammoniac renferme 88,0 pour 100 et bout à 114°,2 ; celle de chlorure de calcium renferme 325 pour 100 et ne bout qu'à 179°,5.

§ 7. PHÉNOMÈNES DE CALÉFACTION. — ÉTAT SPHÉROÏDAL.

Quand on projette quelques gouttes d'eau sur un métal incandescent, ces gouttes conservent leur forme sphérique, comme

celles du mercure sur le verre ou sur tout autre corps qu'il ne mouille pas; le liquide reste transparent, et bien que la température du métal surpasse de beaucoup 100°, on ne remarque aucune trace d'ébullition dans les gouttes d'eau, qui toutefois s'évaporent lentement, puisque, au bout d'un certain temps, elles finissent par disparaître. M. Boutigny, qui a étudié avec soin les faits de ce genre, nomme *état sphéroïdal* cette forme particulière d'un liquide en contact avec un corps dont la température est très élevée. Le même physicien a aussi adopté le terme de *caléfaction*, qui nous semble préférable, parce qu'il n'implique aucune idée théorique préconçue.



Fig. 96. — Lampe éolipyle de Breuzin pour l'étude de l'état sphéroïdal.

Décrivons les principales circonstances du phénomène. Prenons pour cela une capsule métallique, dont la surface intérieure soit bien nette et polie, de platine, de fer, d'argent, et portons-la au rouge sur un fourneau ou mieux sur la lampe *éolipyle* de M. Breuzin (fig. 96). Jetons alors dans la capsule une certaine quantité d'eau froide; les gouttes du liquide réunies sur le fond du creuset formeront un globule qui va se mettre à tourner rapidement sur lui-même. Ce globule, dont la forme générale est celle d'un ellipsoïde aplati, est dentelé sur ses bords et sur les contours de ses parallèles. Le nombre des dents de ces sortes d'étoiles est toujours pair, ainsi que l'a remarqué un savant, M. Laurent, qui attribue cette apparence aux oscillations ou vibrations du globule refoulé par la vapeur jaillissant par-dessous. Cette évaporation, venons-nous de dire, est ordinairement fort lente, et l'on cite une expérience de Pouil-

let, qui a pu conserver pendant plusieurs heures, dans un creuset de platine incandescent, l'eau dont ce creuset était rempli, sans que le poids du liquide eût sensiblement diminué.



Fig. 97. — Forme étoilée d'un globule à l'état sphéroïdal.

Le globule n'est pas réellement en contact avec le métal sur lequel il semble reposer ; voici comment M. Boutigny est parvenu à démontrer ce fait, qui du reste s'explique aisément par l'interposition entre le globule et le creuset d'une mince couche de vapeur dont la force élastique suffit à maintenir le liquide à distance. Portant au rouge un mince disque d'argent parfaitement horizontal, il versait à sa surface la goutte d'eau préalablement rendue opaque par le noir de fumée, ou encore noircie avec de l'encre ; puis il essayait de regarder au travers, à la hauteur du disque, la flamme d'une bougie. La lumière, interceptée en haut par le globule, en dessous par l'épaisseur de la plaque, était parfaitement visible dans le très petit intervalle en forme de ménisque qui les séparait. On a reconnu en outre qu'un courant électrique est interrompu, du globule au disque métallique, quand on met en communication l'une des électrodes avec le liquide et l'autre électrode avec le métal. Cette seconde expérience est due à Poggendorff.

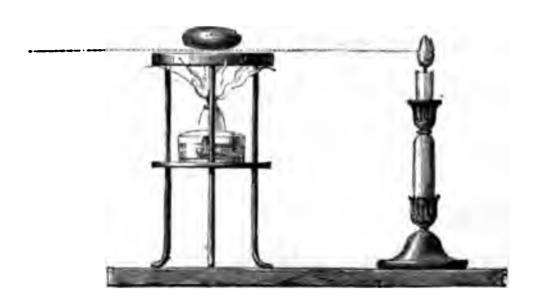


Fig. 98. — Expérience de M. Boutigny. Non-contact du globule liquide et de la plaque incandescente.

Pour expliquer cette persistance de l'état liquide du globule

en présence d'une source de chaleur aussi intense et aussi voisine, on admet que toute la chaleur rayonnée est absorbée dans le phénomène de la lente évaporation que subit la surface du liquide. Ce qui prouve qu'il en est réellement ainsi, c'est la basse température que conserve le globule pendant toute la durée du phénomène. M. Baudrimont a le premier évalué cette température. Dans ce but, il projetait le globule dans une masse d'eau déterminée de température connue, et, par la méthode des mélanges (dont il sera bientôt question), il calculait sa propre température au moment de l'immersion. Il a reconnu qu'elle était toujours inférieure à 100°, mais qu'elle s'élevait avec celle du métal incandescent. Quant à cette dernière, elle a une limite qui dépend de la nature du liquide, et qui est d'autant moins élevée que son point d'ébullition est moins élevé lui-même. Les recherches de M. Boutigny sur la même question lui ont donné les nombres 142°, 134°, 61° pour l'eau, l'alcool absolu et l'éther. Telles sont les limites inférieures de la température que doit avoir le métal, pour que les liquides qu'on vient de nommer prennent l'état globulaire ou sphéroïdal. Aussi, lorsqu'on vient à laisser refroidir la capsule métallique au-dessous de ces températures, aussitôt le contact du globule avec le métal s'établit, et l'ébullition se produit spontanément et avec violence. On fait une expérience qui met bien en évidence le fait de cette brusque vaporisation du liquide. Une bouteille de cuivre étant fortement chauffée (fig. 99), on y introduit une certaine quantité d'eau qui prend immédiatement l'état sphéroïdal. On bouche hermétiquement la bouteille et on la laisse refroidir. Dès que sa température baisse au-dessous de 142°, l'eau se réduit en vapeur et la vapeur ainsi formée a une tension telle, que le bouchon est projeté aussitôt avec violence.

Le globule à l'état sphéroïdal est toujours, comme on vient de le voir, à une température inférieure au point d'ébullition du liquide dont il est formé. Si c'est de l'eau, cette température est moindre que 100°, moindre que 78° si c'est de l'alcool,

que 35°,5 si c'est de l'éther sulfurique; elle est inférieure à — 10°, à — 78°, si le globule est formé d'acide sulfureux ou d'acide carbonique liquide. Cette conséquence du fait général que nous venons de rappeler, a donné lieu à deux des plus intéressantes et des plus frappantes expériences qu'on ait faites sur ce sujet. La première, due à M. Boutigny, consiste à projeter dans un creuset incandescent de l'acide sulfureux anhydre qui prend la forme globulaire et dont la température tombe au-dessous de — 10°. En versant sur le globule quelques gouttes d'eau, elles se congèlent; on a donc ainsi de la glace formée à l'intérieur d'un creuset porté au rouge. La seconde expérience a été réalisée par Faraday; elle consistait à substituer le mercure à l'eau de l'expérience de M. Boutigny, et un mélange d'éther et d'acide carbonique solide à l'acide sulfureux. Au bout de quelques secondes, le mercure était congelé. Tyndall, répétant cette expérience de son illustre maître, introduisait au sein de la masse pâteuse formant le mélange d'éther et d'acide carbonique solide une sphère creuse en laiton pleine d'eau. La congélation de l'eau faisait éclater la sphère, et l'on voyait apparaître une sphère solide de glace sortant d'un creuset chauffé au rouge. Puis, plaçant une certaine quantité de mercure dans une cuiller conique en cuivre, il la plongeait à son tour dans le creuset. En la retirant, et la renversant, on voyait tomber de la cuiller une masse solide de mercure.

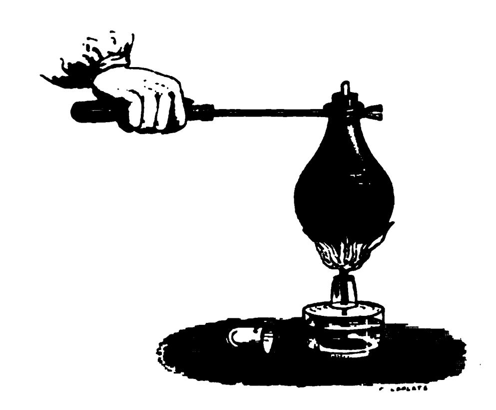


Fig. 99. — Brusque vaporisation de l'eau à l'état sphéroïdal. Explosion due au refroidissement du métal.

Les phénomènes de *caléfaction* que nous venons de décrire avaient été observés déjà, au siècle dernier, par Eller et Lei-

denfrost, puis par Klaproth et Rumford; mais depuis 1842 M. Boutigny en a fait une étude très détaillée. Les ouvriers des verreries et des fonderies connaissaient depuis longtemps quelques-unes des propriétés qu'acquièrent les liquides en présence des corps incandescents, et les premiers savaient même en tirer parti pour leur industrie. Quand, à l'aide de la *canne*, tube de fer creux qui constitue son principal outil, l'ouvrier verrier a pris dans la masse de verre en fusion une certaine quantité de matière, il la plonge dans une cavité remplie d'eau creusée dans un bloc de bois, puis la faisant tourner, il l'arrondit peu à peu. Soufflant ensuite dans la canne, il forme une petite cavité dans la masse de verre et, par le tube, y introduit de l'eau. Celle-ci, comme on l'a vu plus haut, s'évapore lentement sans toucher le verre toujours incandescent, et la vapeur formée agrandit la cavité par sa pression. La masse de verre prend la forme d'une boule creuse en forme de poire.

Les forgerons savent qu'une barre de fer chauffée au rouge blanc et brusquement plongée dans l'eau y reste quelque temps incandescente; le refroidissement n'est pas immédiat; tout autour de la barre il se forme une gaine de vapeur qui empêche le contact. Mais dès que, en quelques-uns de ses points, le refroidissement est suffisant, le contact se produit, et la vaporisation se fait avec bruit et se manifeste par un bouillonnement et la projection violente du liquide hors du vase qui le contient.

Les fondeurs savent aussi de temps immémorial qu'il est possible de plonger le doigt ou même la main tout entière dans un bain métallique en fusion sans se brûler; certains d'entre eux font jaillir avec leurs mains des gouttes de métal hors du creuset, ou même lèchent impunément avec leur langue du fer chauffé à blanc. Ces expériences, qui ont semblé longtemps extraordinaires, inexplicables et qui, pour cette raison, rencontraient de nombreux incrédules, ont été confirmées par les constatations personnelles de M. Boutigny, et répétées fréquemment depuis. L'explication de cette incombustibilité tem-

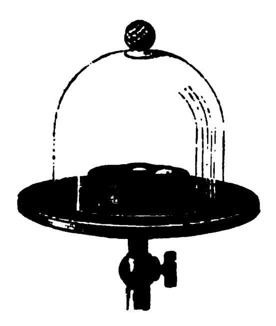
poraire de la peau et en général des tissus vivants est celle-ci : la surface de notre peau est toujours humide, et cette moiteur augmente naturellement lorsque nous sommes sous l'impression involontaire d'une épreuve qui motive notre répulsion ou nos craintes ; en plongeant la main dans une masse incandescente, nous lui faisons jouer le rôle des liquides contenus dans les vases très chauds ; il n'y a pas contact réel entre la peau et le métal. Quand on tente cette épreuve, on ne doit évidemment laisser la main qu'un temps assez court ; mais le double mouvement d'immersion et d'émersion ne doit pas être trop brusque, comme le recommande M. Boutigny, parce que la rapidité du mouvement pourrait déterminer le contact avec le métal en fusion. Enfin les personnes qui ont la peau sèche doivent prendre la précaution de l'humecter préalablement d'eau ou d'éther.

§ 8. FROID PRODUIT PAR L'ÉVAPORATION ET PAR LA VAPORISATION.

Pour se réduire à l'état de vapeur, par évaporation spontanée ou par ébullition, une masse liquide exige toujours une certaine quantité de chaleur : nous verrons plus loin les procédés qu'on emploie pour en obtenir la mesure. La chaleur ainsi absorbée est prise dans le foyer s'il s'agit d'ébullition ; elle est enlevée aux corps ambiants, à la partie du liquide non encore évaporée, s'il s'agit d'évaporation. Ce dernier phénomène est donc caractérisé par un refroidissement plus ou moins prononcé, dont l'intensité dépend de l'activité ou de la rapidité avec laquelle il se produit, et qu'on a cherché à utiliser industriellement, comme nous le verrons dans les chapitres consacrés aux applications de la chaleur. Plus tard, nous en étudierons les lois, si importantes pour l'explication de plusieurs phénomènes naturels ; en ce moment, bornons-nous à décrire quelques expériences qui servent à en démontrer la réalité.

La première est connue sous le nom d'*expérience de Leslie*,

parce qu'elle a été imaginée par le physicien de ce nom. Au-dessus d'un large vase en verre ou en porcelaine, rempli d'acide sulfurique concentré, on dispose sur un support métallique une mince capsule en cuivre dans laquelle on verse un peu d'eau. On met le tout sous la cloche d'une machine pneumatique (fig. 100) et on fait le vide. L'évaporation se fait aussitôt avec d'autant plus d'activité que la vapeur d'eau, à mesure qu'elle se forme, est absorbée par l'acide sulfurique, dont l'affinité pour ce liquide est, comme on sait, considérable. Le refroidissement qui en résulte se fait aux dépens de l'eau, qui est bientôt congelée, et l'on peut retirer un glaçon de la capsule.


Fig. 100. — Expérience de Leslie. Congélation de l'eau par évaporation.

Si l'on remplit d'eau la boule d'un tube thermométrique, qu'on la place dans un vase renfermant de l'éther, et qu'on dispose le tout sous le récipient de la machine pneumatique, quelques coups de piston suffisent pour congeler l'eau, grâce au refroidissement produit par la rapide évaporation de l'éther. On peut même se dispenser de faire le vide, et activer seulement l'évaporation en injectant de l'air à l'intérieur de la masse d'éther au moyen d'un soufflet (fig. 101).

La figure 102 représente un petit appareil connu sous le nom de *cryophore*, imaginé par le docteur Wollaston pour congeler l'eau par le fait de son évaporation dans le vide. C'est un tube doublement recourbé, terminé par deux boules, dont l'une B est à moitié remplie d'eau, et dont l'air a été chassé par ébullition. On plonge la seconde boule A dans un mélange réfrigérant. La vapeur qui se forme en B se répand dans la boule A, où elle se condense sous l'influence de la basse température du mélange, et l'eau qui reste en B se congèle.

En répétant l'expérience de Leslie et en entourant la cloche elle-même d'un mélange réfrigérant, Gay-Lussac a obtenu un froid beaucoup plus intense, suffisant pour congeler le mercure.

On arrive au même résultat sans employer le vide, mais en faisant usage de l'acide sulfureux liquide. Voici comment on dis-



Fig. 101. — Congélation de l'eau par l'évaporation de l'éther.

pose l'opération : Dans un tube de verre, on introduit une certaine quantité de mercure, qu'on recouvre d'acide sulfureux

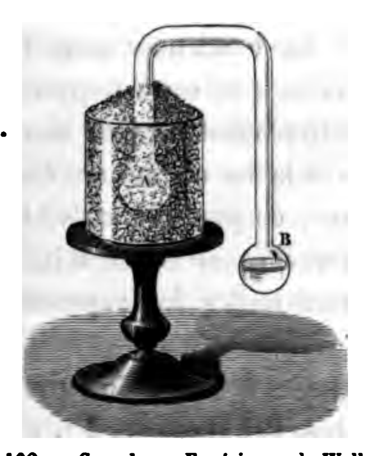




Fig. 102. — Cryophore. Expérience de Wollaston sur la congélation de l'eau par évaporation.

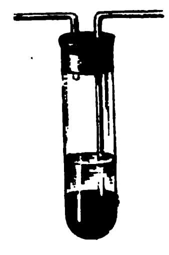


Fig. 103. — Congélation du mercure par évaporation de l'acide sulfureux.

liquide. Le tube est fermé par un bouchon en ébonite, percé de deux trous donnant passage à deux tubes plus petits. L'un d'eux

pénètre dans l'acide et sert à insuffler au moyen d'une vessie, à l'intérieur du liquide, de l'air qui s'échappe par le second tube en entraînant la vapeur de l'acide sulfureux, à mesure qu'elle est formée. L'évaporation déterminée par ce courant au sein du liquide éminemment volatil qu'il traverse, produit un froid assez intense pour qu'en un temps assez court le mercure soit solidifié.

§ 9. LES VAPEURS ET LES GAZ; NOTIONS HISTORIQUES SUR LEUR NATURE.

Y a-t-il une différence essentielle entre les gaz et les vapeurs? Cette question, qu'on pouvait agiter encore il y a quelques années, l'expérience n'ayant point alors complètement prononcé, ne laissait d'ailleurs plus subsister aucun doute dans l'esprit des physiciens contemporains. On distinguait bien encore entre les gaz susceptibles, dans certaines conditions de pression et de température, d'être amenés à l'état liquide, et ne différant plus dès lors des vapeurs émises par les corps qui affectent cet état à la température ordinaire et sous la pression atmosphérique, et les gaz dits *permanents* parce qu'on ne réussissait point à les condenser sous forme liquide. Mais on pensait généralement que cette impuissance était toute relative, que la science trouverait un jour des procédés capables de ramener ces gaz à la loi commune. Comme on le verra dans le chapitre suivant, ce jour est arrivé : tous ces gaz, sans exception, ont été liquéfiés et même solidifiés ; tous sont donc des vapeurs, comme toutes les vapeurs sont elles-mêmes des gaz.

Les notions sur les gaz et les vapeurs étaient bien autrement confuses il y a un siècle tout au plus. Par exemple, il n'y a pas si longtemps qu'on le pourrait croire, qu'on sait avec netteté ce qu'est la vapeur d'eau. On a utilisé ses propriétés mécaniques avant de la connaître. La raison en est bien simple : les découvertes toutes modernes des physiciens et des chimistes sur les

gaz n'avaient pas encore appris qu'il y a des différences de constitution entre les substances qui affectent l'état gazeux ou aériforme. Aussi croyait-on que la vapeur était, soit de l'eau que l'action du feu change en air, soit de l'air ou tout autre fluide subtil qui était primitivement renfermé dans l'eau. L'*Encyclopédie* de D'Alembert et Diderot définit ainsi le mot *vapeur* : « C'est l'assemblage d'une infinité de petites bulles d'eau ou d'autres matières liquides, remplies d'air raréfié par la chaleur et élevées par leur légèreté jusqu'à une certaine hauteur dans l'atmosphère, après quoi elles retombent, soit en pluie, soit en rosée, soit en neige, etc. » C'était, comme on voit, confondre la vapeur proprement dite, toujours invisible, avec les nuées visibles, comme le prouvent d'ailleurs les lignes suivantes : « Les masses de cet assemblage, qui flottent dans l'air, sont ce qu'on appelle *nuages*. »

Voici comment s'exprime sur le même sujet Bossut, qui écrivait en 1755, c'est-à-dire quatre-vingts ans après l'invention de la machine à vapeur : « Le feu fait sortir de l'eau, en forme de vapeur, un fluide très léger, très subtil, très élastique, capable de faire équilibre à des poids considérables.... Cette vapeur n'est pas de l'air qui se dégage de l'eau, comme quelques personnes pourraient le penser. » Il cite alors, pour appuyer cette manière de voir, une expérience de Désaguliers qu'il est superflu de reproduire, et il ajoute en matière de conclusion : « Il paraît que la vapeur est un fluide particulier, mêlé dans l'eau, ou, si l'on veut, la partie la plus subtile de l'eau, que le feu met en action, et qui perd subitement sa vertu expansive, jusqu'à n'occuper qu'un volume presque infiniment petit, quand on la refroidit d'une manière quelconque. »

L'idée que la vapeur n'est autre que l'eau elle-même transformée en gaz par l'action de la chaleur, n'était pas claire encore à cette époque; on le voit par les passages que je viens de transcrire. Mais aucun doute n'existe plus désormais sur les circonstances de cette transformation, comme nous l'avons pu voir dans ce chapitre.

Aujourd'hui encore cependant, bien des personnes ne se font pas une idée exacte de ce qu'est une vapeur et confondent avec elle le produit de sa condensation. Pour elles, les nuages, les brouillards sont des vapeurs. Le langage ordinaire autorise sans doute cette confusion, mais il n'en importe que plus de la dissiper.

Les nuages, les brouillards, les brumes plus ou moins épaisses ou légères sont bien le produit de l'évaporation aqueuse à la surface du globe, des continents ou des mers; mais il ne faut pas les confondre avec la vapeur d'eau elle-même, qui est toujours invisible dans l'air. La vapeur d'eau est un gaz d'une parfaite transparence, dont l'accumulation dans l'atmosphère ne produit immédiatement aucun trouble. Quand l'eau dont elle est formée devient visible sous l'apparence de nuages, de brouillards, c'est qu'une certaine quantité de cette vapeur s'est, pour une cause quelconque, condensée, a repassé à l'état liquide. Par les temps froids, l'haleine des personnes et celle des animaux laissent échapper une légère traînée qu'on prend pour de la vapeur, tout comme le panache blanchâtre qui s'échappe par bouffées de la cheminée d'une locomotive. L'idée qu'on se fait ainsi, répétons-le, est fausse; elle provient d'une locution inexacte. Dans tous les exemples qu'on vient d'indiquer, c'est bien la vapeur d'eau qui a donné naissance à la nuée plus ou moins blanche et plus ou moins opaque qu'on observe; mais ce qu'on voit n'est plus, à dire vrai, de la vapeur. C'est la réunion d'une multitude de gouttelettes très fines, de particules d'eau très ténues, qui quelquefois s'évaporent à nouveau, et d'autres fois se réunissent, se condensent davantage, tombent en pluie plus ou moins fine, quand le poids de chacune d'elles est devenu assez fort pour vaincre la résistance de l'air qui jusque-là les a supportées. Pourquoi, quand on chauffe de l'eau dans un vase, voit-on une buée s'échapper à travers les fissures du couvercle? N'est-ce pas là le phénomène lui-même de l'évaporation, que suit d'ailleurs la vaporisation proprement dite, dès que la température de l'ébullition se

trouvera atteinte? Oui, mais ces nuages qui s'élèvent à la surface de l'eau ne sont plus de la vapeur; celle-ci, en traversant les couches qui surplombent le vase, couches plus froides que l'eau, se condense immédiatement à cause du refroidissement qu'elle éprouve; elle se répand, en vertu de sa force expansive, dans l'espace environnant, où sa dissémination extrême la rend invisible. Mais alors on peut observer le dépôt de gouttelettes humides sur les corps voisins, et notamment sur la face interne du couvercle du vase; elles s'y accumulent en gouttes plus grosses qui ruissellent.

Les remarques qui précèdent ont, pour l'explication et l'intelligence des phénomènes météorologiques, une grande importance, ainsi que nous aurons l'occasion de le voir par la suite; c'est la raison qui nous a fait autant insister sur ce point.

CHAPITRE IX

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS — CONDENSATION DES VAPEURS — LIQUÉFACTION DES GAZ

§ 1. PASSAGE DES VAPEURS A L'ÉTAT LIQUIDE. — SUBLIMATION ; CONDENSATION.

On a vu, dans le chapitre précédent, quelles conditions sont nécessaires pour qu'une vapeur reprenne en totalité ou en partie l'état liquide qu'elle possédait avant sa formation. Si l'espace qu'elle occupe est saturé, tout refroidissement peut précipiter ou condenser une certaine quantité de cette vapeur ; si l'espace n'est point saturé, il faudra le refroidir d'abord assez pour déterminer la saturation eu égard à la quantité de vapeur qu'il renferme ; un nouvel abaissement de température produira alors la condensation cherchée. Une vapeur saturée peut encore être ramenée à l'état liquide par compression, c'est-à-dire en diminuant son volume. Ces deux moyens, l'abaissement de température ou la compression, dont chacun est suffisant lorsqu'il s'agit d'une vapeur proprement dite, peuvent être dès lors employés isolément, comme nous l'avons vu quand nous avons décrit les expériences fondamentales de Dalton ; si on les emploie simultanément, la précipitation des vapeurs se fait naturellement avec plus d'abondance et de rapidité.

Le passage d'un liquide à l'état gazeux, par évaporation ou vaporisation, exige l'absorption d'une certaine quantité de chaleur, qu'on est convenu d'appeler *chaleur latente* de vaporisation, parce que, emmagasinée pour ainsi dire dans la vapeur

produite, et nécessaire pour maintenir l'état gazeux, elle ne se manifeste pas d'une manière sensible au thermomètre. Or, dans la transformation inverse, dans le retour de la vapeur à l'état liquide, cette chaleur se trouve restituée : nous verrons plus loin que la quantité de chaleur qu'on retrouve ainsi par la liquéfaction d'un poids donné de vapeur, est exactement égale à celle qu'avait exigée l'acte de la vaporisation lui-même. En un mot, les lois de la condensation des vapeurs sont inverses de celles que nous avons vues présider à leur formation, et ce que nous disons ici des vapeurs s'applique pareillement aux gaz, que nous devons considérer comme des vapeurs plus ou moins éloignées de leur point de saturation.

La précipitation de la vapeur d'eau dans l'air sous l'influence du refroidissement est un des phénomènes les plus fréquents et les plus aisés à observer (au moins dans ses effets) que nous offre l'atmosphère ambiante : la rosée, les brouillards et les nuages, les pluies ont pour cause principale la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air produite par un abaissement de température au-dessous du point de saturation. Nous reviendrons plus tard sur ces phénomènes, dans les chapitres de ce volume qui seront consacrés à la Météorologie.

Nous avons vu certains corps solides se transformer directement en vapeur, sans passer par l'état liquide. En refroidissant, par des procédés convenables, les vapeurs de ces corps ou d'autres corps liquéfiés, on peut également les ramener à leur premier état, l'état solide, sans qu'ils se liquéfient, et l'on donne le nom commun de *sublimation* à la double opération que nous venons de définir. L'avantage qu'on trouve à ce retour direct de la vapeur à l'état solide, c'est qu'il permet d'obtenir de beaux cristaux du corps en expérience. Voici, d'après M. Schützenberger, quelques exemples de ce mode de cristallisation, qui réussit surtout pour les substances ayant une tension de vapeur sensible à une faible distance au-dessus ou au-dessous de leur point de fusion :

« Pour obtenir de beaux cristaux, dit-il, il faut s'arranger de

façon à maintenir et à renouveler constamment les vapeurs dans une enceinte dont une partie des parois conserve une température inférieure au point de liquéfaction. Plus le phénomène sera lent, plus les cristaux obtenus seront volumineux. Les conditions à remplir sont donc celles-ci : un compartiment de l'enceinte contient le corps solide ou fondu qui doit servir de générateur de vapeurs ; il est maintenu à une température aussi basse que possible, quoique suffisante pour déterminer une volatilisation lente et continue. Les vapeurs qui se diffusent rencontrant les parois plus froides d'une autre partie de l'enceinte, s'y condensent sous forme de cristaux qui serviront de centres d'attraction pour les vapeurs incessamment renouvelées.



Fig. 104. — Appareil pour la sublimation de petites quantités de matière.

« Quand le corps a une tension de vapeur appréciable à la température ambiante, il suffit d'une légère inégalité de température d'un point à un autre des parois du vase pour déterminer le transport. C'est ainsi que le camphre, l'iode, le protochlorure d'iode, placés dans un flacon dont l'une des faces est tournée vers une fenêtre, se subliment lentement et viennent former des dépôts cristallins contre cette paroi, si la température du dehors est plus basse que celle de l'appartement.

« On emploie avec avantage, pour la sublimation de petites quantités de matière, deux verres de montre de même diamètre, dont les bords rodés (fig. 104) s'appliquent exactement l'un sur l'autre, et que l'on maintient au moyen d'une lame de clinquant à deux fentes. La substance est placée dans le verre inférieur,

qui repose sur un disque annulaire. En chauffant doucement la partie inférieure avec un bain de sable ou de l'air chaud, on transporte toute la matière volatile contre le verre supérieur, qui se tapisse intérieurement de cristaux. Cette opération peut aussi se faire dans un petit creuset de porcelaine (fig. 105) fermé par son couvercle et une feuille de papier

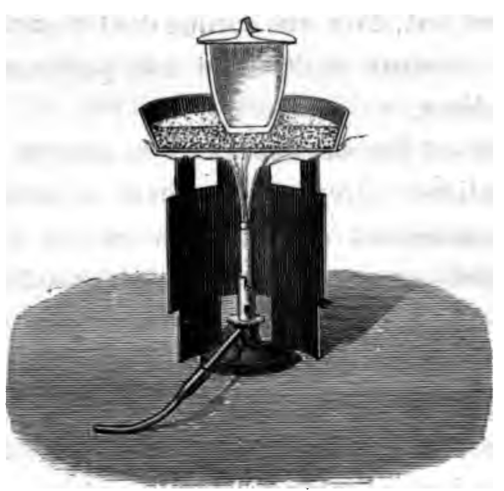


Fig. 105. — Sublimation de l'alizarine.

à filtre, et chauffé par en bas sur un bain de sable. On sublime ainsi très bien l'alizarine, l'anthracène, l'anthraquinone et des corps à point de fusion élevé et rapproché du point de volatilisation. « L'appareil suivant (fig. 106) sert à la sublimation de la naphtaline, de l'acide benzoïque, etc., sur une plus grande échelle. Une marmite en tôle est coiffée d'un cône de carton ou de papier, contre les parois internes duquel viennent se déposer les cristaux. Si l'on veut éviter les produits huileux qui se dégagent souvent d'une matière impure, il suffit de couvrir en outre



Fig. 106. — Sublimation de l'acide benzoïque, de la naphtaline.

la marmite avec un papier à filtre poreux, que l'on colle contre

ses parois[1]. La sublimation s'effectue aussi dans une fiole à fond plat, dans une cornue dont la partie inférieure est chauffée; les cristaux se déposent à la partie supérieure, dans le col ou le dôme. »

Il est des substances fixes, comme le tellure, qu'on ne peut sublimer directement; mais on arrive à les volatiliser par entraînement en faisant passer sur le corps convenablement chauffé un courant gazeux n'exerçant pas sur lui d'action chimique. L'air, l'acide carbonique, la vapeur d'eau surchauffée, l'hydrogène sont employés suivant les cas. Pour le tellure, on dirige un courant lent d'hydrogène au travers d'un tube de porcelaine chauffé au rouge; le corps contenu dans une nacelle est placé à l'intérieur du tube, et les cristaux de tellure vont se déposer sur les parois de la partie froide du tube.

§ 2. LIQUÉFACTION DES GAZ.

Lavoisier, dans son remarquable *Mémoire sur la formation et la constitution de l'atmosphère*[2], émettait l'hypothèse qu'un refroidissement suffisant pourrait condenser l'air, ou du moins une partie des substances aériformes qui le composent, au point de les faire passer à l'état liquide. Peu d'années après cette prévision du grand chimiste, l'ammoniaque était liquéfiée. D'une part, Guyton de Morveau obtenait ce résultat en abaissant à 49° au-dessous de zéro la température d'un ballon plein de ce gaz, à l'aide d'un mélange de neige et de chlorure de calcium. D'un autre côté, Van Marum ayant comprimé à plusieurs atmosphères, sous le récipient d'une machine de compression, le gaz ammoniac contenu dans une éprouvette qui reposait sur le mercure, vit ce dernier liquide monter dans l'éprouvette et la remplir tout à fait. Ce qui donne un intérêt particulier à ces deux premières tentatives de liquéfaction des gaz, c'est que chacune d'elles fournit un exemple de l'application des deux mé-

1. *Traité de Chimie générale*, par P. Schützenberger, t. I, p. 43.
2. Voir plus haut, page 15.

thodes susceptibles de résoudre le problème : le refroidissement du gaz et sa compression.

C'est à Faraday que revient l'honneur des premiers travaux suivis dans cette voie. Dès 1823, le savant physicien anglais obtenait à l'état liquide les gaz suivants : le chlore, l'acide sulfureux, l'acide sulfhydrique, l'oxyde de chlore, l'acide carbonique, l'ammoniaque, le protoxyde d'azote et le cyanogène. L'acide chlorhydrique fut liquéfié de la même manière par Davy, qui avait, paraît-il, suggéré à son élève et préparateur l'expérience qui donna le chlore liquide[1].

La méthode et l'appareil de Faraday étaient également simples, mais les expériences exigeaient de grandes précautions : à cause du danger des explosions et de la fracture des vases, il avait soin de garnir ses mains de gants et de se couvrir la figure d'un masque. Il introduisait dans un tube recourbé en forme de V renversé (fig. 107) les substances propres à donner naissance au gaz à liquéfier[2], les rassemblait à l'extrémité bouchée

1. Voici comment Tyndall raconte le fait dans sa remarquable notice intitulée *Faraday inventeur* : « Dans les heures de loisir que ses occupations lui laissaient, Faraday se donnait toujours à lui-même des sujets de recherches. C'est ainsi que, dans le printemps de 1823, il commença de sa propre inspiration l'étude d'une substance que l'on avait longtemps prise pour du chlore solide, mais dans laquelle Davy avait reconnu en 1810 un hydrate de chlore, c'est-à-dire un composé de chlore et d'eau. Faraday le premier analysa cet hydrate et rédigea une note sur sa composition. Cette note fut lue par Davy, qui lui conseilla de chauffer son hydrate sous pression dans un tube de verre scellé. Il le fit. L'hydrate entra en fusion à la température du sang, le tube se remplit d'un gaz jaune, et l'on constata qu'il contenait deux liquides. Le docteur Paris entra par hasard dans le laboratoire pendant que Faraday était à l'œuvre. Ayant aperçu le liquide huileux dans le tube, il railla le jeune chimiste du peu de soin qu'il apportait à nettoyer ses verres. Quand Faraday lima le bout de son tube, le contenu fit explosion et la matière huileuse disparut. Le lendemain matin, le docteur Paris reçut ce petit mot : « Cher monsieur, cette *huile* que vous avez vue hier était décidément du chlore liquide. Votre fidèle, M. Faraday. » Le gaz s'était liquéfié sous sa propre pression. Faraday essaya ensuite la compression par une pompe, et réussit encore à obtenir du chlore liquide.

« Au compte rendu qui fut publié de cette expérience, Davy ajouta cette note : « En conseillant à M. Faraday de chauffer l'hydrate de chlore dans un tube fermé, je pensais qu'il arriverait de trois choses l'une : qu'il se liquéfierait à l'état d'hydrate, ou que l'eau serait décomposée, ou que le chlore se séparerait à l'état liquide. » Davy, en outre, appliqua immédiatement la méthode de la compression des gaz par eux-mêmes à la liquéfaction de l'acide chlorhydrique. Faraday poursuivit ses expériences et parvint à liquéfier un certain nombre de gaz que l'on avait rangés jusqu'alors parmi les gaz permanents. En 1844, il reprit ce travail et étendit beaucoup ses limites. »

2. Par exemple, en chauffant de l'acide sulfurique anhydre et du mercure, Faraday obte-

et fermait l'autre extrémité à la lampe. Puis, chauffant la partie du tube contenant les matières introduites, tandis que l'autre branche était plongée dans un mélange réfrigérant, le gaz se dégageait ; sa tension allait en augmentant, et dès qu'elle dépassait la tension maximum correspondant à la température de la partie froide, la condensation commençait et le gaz liquéfié s'accumulait dans l'extrémité plongée dans le mélange réfrigérant. Faraday mesurait la pression du gaz à l'aide d'un petit



Fig. 107. — Appareil de Faraday pour la liquéfaction des gaz.

manomètre à air, préalablement gradué et introduit dans le tube. La densité du liquide se mesurait approximativement au moyen de petites boules de verre, dont le degré d'enfoncement dans des liquides de densités différentes avait été d'avance constaté.

Six ans avant l'importante découverte de la liquéfaction des

nait le gaz sulfureux ; pour l'acide sulfhydrique, il mettait du sulfure d'antimoine et de l'acide chlorhydrique ; du carbonate d'ammoniaque et de l'acide sulfurique lui donnaient l'acide carbonique ; la décomposition du nitrate d'ammoniaque bien sec, le protoxyde d'azote ; du cyanure de mercure bien sec, le cyanogène ; du chlorure ammoniacal d'argent, l'ammoniaque ; de l'ammoniaque et de l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique, etc. Le degré de température à laquelle il fallait élever la partie chauffée du tube, le degré de froid auquel était soumise la partie opposée variaient naturellement, selon la nature de gaz à produire ou des substances employées dans ce but.

gaz par Faraday, Despretz avait obtenu de l'euchlorine liquide, en faisant passer le gaz desséché dans un tube de verre entouré d'un mélange réfrigérant exposé à une très légère chaleur; ce liquide, de couleur verdâtre, avait produit une détonation pareille à celle d'un coup de fusil, et le tube qui le contenait avait été réduit en poudre.

En 1824, Bussy obtint l'acide sulfureux liquide, sous la pression normale, à l'aide d'un mélange réfrigérant dont la température accusait — 10°. La figure 108 représente l'appareil ainsi qu'on le dispose pour reproduire l'expérience dans les cours. Le

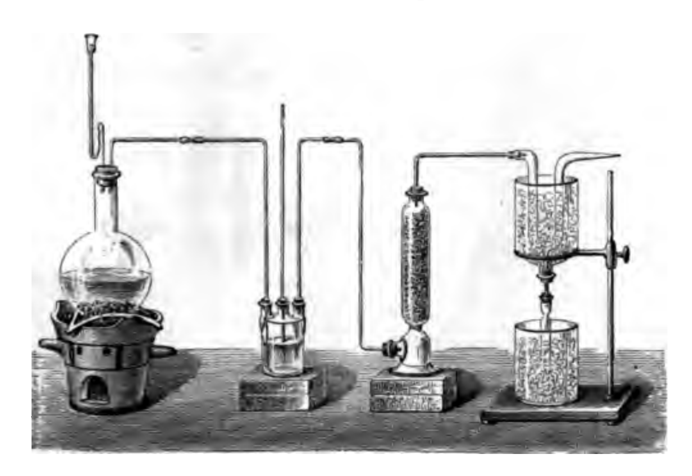


Fig. 108. — Appareil de Bussy pour la liquéfaction de l'acide sulfureux.

ballon qu'on voit à gauche reçoit l'acide sulfurique et le métal (ordinairement du mercure) qu'on chauffe pour obtenir le dégagement du gaz. Ce dernier se rend d'abord à un flacon laveur et à une éprouvette renfermant du chlorure de calcium. Ainsi purifié et desséché, il aboutit à un tube en U plongé dans un mélange réfrigérant (glace et sel marin ou chlorure de calcium), où il se refroidit, se condense et se liquéfie. De là on le recueille dans un ballon pareillement plongé dans un mélange réfrigérant. On le conserve ordinairement dans des tubes scellés à la lampe ou dans des flacons analogues à ceux qui servent à contenir l'eau de Seltz; comme à la température ordinaire de + 15 à 20°, la tension du gaz n'est que de 2 à 3 atmosphères, la résistance

des vases dont nous parlons est parfaitement suffisante pour qu'il n'y ait pas à craindre de rupture.

Les gaz liquéfiés, notamment l'acide carbonique, ayant été utilisés pour produire des abaissements considérables de température, on a dû chercher des procédés qui permissent de les obtenir en quantités un peu grandes et des appareils d'une solidité exceptionnelle. Dès 1835, Thilorier imagina l'appareil



Fig. 109. — Appareil de Thilorier pour la liquéfaction en grand de l'acide carbonique.

qui, convenablement modifié, sert encore à la production de l'acide carbonique liquide.

Deux parties principales composent cet appareil. La première est le *générateur*, vase hermétiquement fermé, où se forme le gaz acide carbonique, par la réaction de l'acide sulfurique sur le bicarbonate de soude. La seconde partie, le *récipient* ou *récepteur*, est un vase semblable au premier, où se rend l'acide carbonique, par voie de distillation, et où peut s'accumuler le produit d'une série d'opérations successives.

A l'origine les parois de ces vases étaient en fonte de fer très

épaisse; mais le terrible accident qui coûta la vie à Hervy[1], fit proscrire l'emploi de ce métal dangereux. On lui substitua le cuivre doublé de plomb à l'intérieur, comme l'était d'ailleurs la fonte, pour éviter l'action de l'acide sulfurique. Des bandes de fer forgé et des cercles du même métal enveloppent ces sortes de chaudières; dont la forme est celle de cylindres terminés par des calottes sphériques. La solidité des deux appareils, générateur et récepteur, est ainsi assurée à toute épreuve. L'un et l'autre sont fermés par des bouchons à vis percés suivant leurs axes, et munis de tubulures à robinet RR, pouvant communiquer l'une avec l'autre par un tube de cuivre *t*. Les deux réservoirs sont d'ailleurs suspendus entre les pointes de supports en fonte, ce qui permet de les faire basculer autour d'un axe horizontal, disposition qui n'est d'ailleurs nécessaire que pour celui des cylindres qu'on emploie comme générateur.

Quand on veut faire une préparation d'acide carbonique liquide à l'aide de l'appareil Thilorier, on enlève le bouchon du générateur, et on y introduit 1800 grammes de bicarbonate de soude avec $4^{lit},5$ d'eau à 35° ou 40°, puis un vase cylindrique *a* renfermant 1 kilogramme d'acide sulfurique concentré. Ce cylindre, reposant par une pointe sur le fond et dans l'axe du générateur, reste vertical tant que ce dernier l'est lui-même, de sorte qu'il n'y a pas de contact entre l'acide et le bicarbonate de soude *m*. Serrant alors le bouchon et fermant le robinet de communication avec le tube *t*, on incline le générateur de manière à lui faire dépasser l'horizontale. Par ce mouvement de bascule répété plusieurs fois, l'acide se répand sur le sel, et la réaction se manifeste instantanément.

1. « Le 29 décembre 1840, on avait disposé l'expérience de Thilorier pour une leçon de chimie à l'École de pharmacie de Paris; Hervy, préparateur du cours, était resté seul à côté de l'appareil. Tout à coup une forte détonation se fit entendre, et les professeurs qui se trouvaient dans une pièce voisine étant accourus, virent le malheureux jeune homme étendu à terre et mutilé par les éclats du récipient qui avait cédé à l'énorme pression du gaz dégagé. Transporté à l'hôpital après cet accident, Hervy dut subir l'amputation des jambes, et malgré les soins qui lui furent prodigués, il mourut trois jours après. » (P. Deleveau, *La matière et ses transformations*, 1 vol. de la Bibliothèque des merveilles.)

Dix minutes au plus suffisent ordinairement pour le dégagement complet du gaz. On ouvre alors les robinets, et l'acide carbonique, dont la tension dans le générateur atteint jusqu'à 75 atmosphères (pour une température de 30°), se précipite dans le récepteur, où il se condense en vertu de la différence des températures et par suite de celle des tensions. Si le récepteur est à 15°, la tension maximum de l'acide carbonique pour cette température étant de 50 atmosphères, la différence sera de 25 atmosphères. Aussi suffit-il d'une minute pour que la distillation du gaz produit soit complète et que le gaz du générateur ait passé à l'état liquide dans le récepteur.

En recommençant cinq ou six opérations semblables, on obtient aisément deux litres d'acide carbonique liquide. Le récepteur se trouve donc en grande partie rempli par ce dernier, que surmonte une atmosphère gazeuse d'une tension de 50 atmosphères. Si alors on ouvre le robinet, le liquide est projeté avec une grande violence au dehors; le courant gazeux qui en résulte détermine un abaissement de température considérable; une partie du liquide se solidifie sous l'action de ce froid intense, et l'on voit un nuage blanc sur le passage du jet. On peut recueillir l'acide carbonique solide sous la forme d'une neige floconneuse, à l'aide d'une boîte d'une construction spéciale que Thilorier joignit à son appareil, et dont la figure 110 indique l'agencement. Elle se compose de deux parties séparées qui s'emboîtent aisément l'une dans l'autre, chacune étant munie d'une poignée garnie de drap pour éviter le contact des parois métalliques excessivement refroidies. La boîte s'ajuste par une tubulure à une pièce du robinet du récepteur, et quand on ouvre ce robinet, le jet d'acide carbonique liquide pénètre dans la boîte, frappe une languette *a*, se divise, s'évapore en partie et se solidifie pour le surplus, à une température de —78°. Sous sa forme

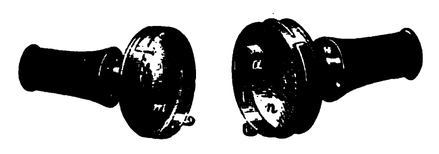


Fig. 110. — Boîte servant à recueillir l'acide carbonique solide.

solide, ou de neige blanche floconneuse, l'acide carbonique a une faible conductibilité, qui permet de le conserver plus longtemps qu'à l'état liquide. On peut en tenir sur la main sans inconvénient, à cause du courant gazeux qui s'en dégage et empêche le contact (de la même manière que la vapeur dans le phénomène de caléfaction); mais si on l'appuie contre la peau, de manière à le comprimer et à rendre le contact intime, on éprouve une sensation douloureuse analogue à celle que cause une brûlure : la peau conserve des traces toutes pareilles de désorganisation.

En 1861, MM. Loir et Drion ont obtenu l'acide carbonique liquide sous la pression de l'atmosphère. Voici comment ces savants procédaient : « Si l'on introduit de l'ammoniaque liquide dans un ballon de verre, et qu'on mette l'intérieur de ce ballon en communication avec une bonne machine pneumatique, par l'intermédiaire d'un vase contenant du coke imprégné d'acide sulfurique, la température du liquide s'abaisse rapidement dès les premiers coups de piston. Ce liquide commence à se solidifier vers —81°; bientôt il se prend en masse, et si la machine pneumatique permet de réduire la pression jusqu'à 1 millimètre de mercure environ, la température de l'ammoniaque solide s'abaisse de quelques degrés encore et atteint —89°,5. Cette limite est suffisante pour déterminer la liquéfaction de l'acide carbonique sous la pression de l'atmosphère; en faisant passer un courant de gaz carbonique sec dans un petit tube en U plongeant dans l'ammoniaque, nous avons constaté en effet que le gaz se liquéfiait; mais, comme la température obtenue est inférieure d'un petit nombre de degrés seulement à celle qui correspond à la saturation, on n'obtient jamais qu'une liquéfaction très peu abondante[1]. »

En faisant intervenir une pression de 3 à 4 atmosphères, la même expérience, convenablement modifiée, donne en très

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1861, t. I.

peu de temps de notables quantités d'acide carbonique solide. Le gaz est produit en chauffant du bicarbonate de soude bien sec dans un matras de cuivre rouge et se rend par un tube fermé dans une cloche renversée contenant l'ammoniaque qu'on refroidit comme précédemment par l'évaporation dans le vide. Un manomètre à air comprimé donne la tension du gaz dans le matras et dans le tube. On voit bientôt alors apparaître sur les parois du tube qui plonge dans l'ammoniaque, des cristaux transparents dont la masse augmente rapidement et, au bout d'une demi-heure, atteint environ 25 grammes. « L'acide carbonique solide, disent MM. Drion et Loir, obtenu dans les conditions que nous venons de faire connaître, se présente sous la forme d'une masse incolore, ayant la transparence de la glace. On la détache aisément des parois du tube condenseur, au moyen d'une baguette de verre : elle se divise alors en gros cristaux d'apparence cubique, ayant de 3 à 4 millimètres de côté. Ces cristaux, exposés à l'air, reprennent lentement l'état gazeux ; ils s'évaporent sans laisser de résidu. Déposés sur la main, ils ne font éprouver aucune sensation immédiate de chaleur ou de froid ; ils se laissent difficilement saisir entre les doigts, et s'échappent, sous une faible pression, comme s'ils étaient enveloppés d'une matière éminemment onctueuse. Lorsqu'on réussit à maintenir un de ces cristaux entre le pouce et l'index, il ne tarde pas à produire une brûlure insupportable. »

Mélangé avec un liquide qui ne se combine pas chimiquement avec lui, tel que l'éther, l'acide carbonique neigeux subit une évaporation très rapide, due à l'accroissement de conductibilité que lui donne le liquide interposé. La substance pâteuse ainsi formée constitue un mélange réfrigérant d'une grande énergie. Sous le récipient de la machine pneumatique, l'évaporation en est plus rapide encore et l'on peut ainsi abaisser la température à —100°. Un kilogramme de mercure est congelé par ce mélange en quelques minutes, et en y plongeant un tube hermétiquement fermé plein d'acide carbonique liquide, ce

dernier se solidifie sous la forme d'une masse vitreuse parfaitement transparente.

Avant d'aborder la description des expériences récentes, qui ont achevé la démonstration, si heureusement commencée par Faraday, de la possibilité de liquéfier les gaz jusqu'alors réputés permanents, disons un mot de l'appareil construit dès 1844 par un savant professeur de l'université de Vienne, M. Natterer. Cet appareil, représenté en coupe dans la figure 111, permet de comprimer mécaniquement les gaz dans un réservoir où ils se liquéfient sous la double influence de la pression et du refroidissement. Un simple coup d'œil jeté sur la figure permettra de comprendre aisément comment il fonctionne. Un récipient métallique en forme de poire allongée, à parois épaisses, est plongé dans un vase contenant un mélange de glace et de sel. Il communique inférieurement avec un long corps de pompe cylindrique où se meut un piston plein; l'orifice de communication est muni d'une soupape qui s'ouvre de bas en haut. Le gaz arrive par une tubulure latérale et se trouve refoulé dans le réservoir par le jeu de la pompe. La chaleur dégagée par la compression dans le cylindre se trouve absorbée par un manchon où l'on entretient une circulation d'eau froide.



Fig. 111. — Appareil de Natterer pour la compression et la liquéfaction des gaz.

M. Natterer a liquéfié ainsi l'acide carbonique et le protoxyde d'azote.

Tous les gaz dont nous avons parlé jusqu'ici forment des liquides incolores, le chlore excepté, qui donne un liquide jaune oléagineux. On vient de voir que l'acide sulfureux se solidifie à —79°; il a alors l'apparence de flocons blancs cristallins. L'acide sulfhydrique se solidifie également à —85°,5 en une masse transparente; le cyanogène se solidifie à —40°,

en masse radiée et cristalline ayant l'aspect de la glace; enfin le protoxyde d'azote prend aussi l'état solide, à une température de 100 degrés au-dessous de zéro. Mais ni le chlore ni l'acide chlorhydrique n'ont pu encore être solidifiés.

Terminons ce paragraphe par quelques nombres exprimant les tensions de vapeur de quelques gaz avec la température de liquéfaction correspondante :

Gaz.	Température de liquéfaction.	Pression en atmosphères.
Acide sulfureux.	— 10°	1
—	0°	1,5
—	+ 20°	3,5
Acide sulfhydrique	— 74°	1
—	— 50°	2
—	— 1°,1	9,9
—	+ 11°,1	14,6
Acide chlorhydrique.	0°	26,2
—	+ 4°,4	30,7
Protoxyde d'azote.	— 87°	1
—	— 40°	8,7
—	+ 1°,5	33,4
Ammoniaque	— 35°,7	1
—	0°	4,4
—	+ 16°	7
Cyanogène.	— 22°	1
—	0°	2,2
Chlore	0°	6,5
— . . . . entre — 34°,5 et	— 50°	1
Acide carbonique	— 59°,4	4,6
—	— 15°	24,7
—	0°	38,5
—	+ 10°	42
—	+ 31°	74

Deux points frappent dans ce tableau : c'est la tension considérable des vapeurs de ces gaz liquéfiés, pour de basses températures; c'est aussi la rapidité avec laquelle croissent ces tensions quand la température s'élève. Nous complèterons ces brèves notions dans les paragraphes qui vont suivre.

§ 3. POINT CRITIQUE ; HYPOTHÈSE DE LA CONTINUITÉ DES ÉTATS DE LA MATIÈRE.

Malgré les efforts tentés par divers physiciens, malgré la puissance des moyens qu'ils avaient à leur disposition pour essayer de les ramener à l'état liquide[1], un certain nombre de gaz semblaient incoercibles, et se refusaient à toutes les tentatives faites pour obtenir ce changement d'état. Si, théoriquement, il devenait certain, grâce aux succès précédemment obtenus, que tous les gaz doivent être considérés comme des vapeurs diversement éloignées du point où leur force élastique, atteignant sa limite, est vaincue par la cohésion de leurs molécules, du moins dans la pratique il ne semblait pas qu'on pût atteindre ce point, même en combinant les procédés de compression et de refroidissement. Ces gaz réfractaires étaient encore en 1877 au nombre de six, à savoir : l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, l'hydrogène protocarboné ou formène et le bioxyde d'azote.

La question toutefois avait fait un pas, grâce aux recherches et aux expériences de quelques savants, recherches et expériences dont nous allons essayer de donner une idée.

Déjà en 1822 Cagniard de Latour avait observé qu'il n'y a pas toujours une transition brusque entre l'état liquide et l'état gazeux d'un même corps. Ayant renfermé successivement dans des tubes de verre à parois résistantes de l'eau, de l'éther sulfurique, de l'alcool, de manière à ne remplir qu'une partie de chaque tube, puis les ayant scellés à la lampe et chauffés doucement, il constata les phénomènes suivants. Le liquide commençait par se dilater; puis, à certaine limite de tempé-

1. M. Natterer a poussé ses expériences sur la compression des gaz jusqu'à la pression énorme de 2790 atmosphères. En 1861, M. Andrews a soumis l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, l'oxyde de carbone à des pressions supérieures à toutes celles qu'on avait jusqu'alors employées, tout en exposant ces gaz au froid produit par un mélange d'acide carbonique et d'éther : « Aucun de ces gaz, dit-il lui-même, n'avait manifesté la moindre apparence de liquéfaction ; et cependant les effets réunis du refroidissement et de la compression les réduisaient à un cinq-centième et même moins de leur volume normal. »

rature où la capacité du tube était loin d'être remplie, il se réduisait totalement en vapeur, sans laisser aucune apparence de liquide. Ce phénomène se produisait, pour l'éther, à la température de 200°, sous une pression de 37 à 38 atmosphères; l'espace occupé par la vapeur n'était pas double du volume du liquide. Pour l'alcool, la température-limite était 259°, la pression égale à 109 atmosphères, et le volume de vapeur n'était pas tout à fait triple du volume du liquide. Enfin l'eau, à une température peu différente de celle de la fusion du zinc (450°), se réduisait totalement en vapeur dans un espace à peine égal à 4 fois son volume à l'état liquide.

Un membre de la Société royale de Londres, M. Thomas Andrews, commença vers 1861, une série de recherches sur les conditions de pression et de température qui caractérisent le passage de l'état liquide à l'état gazeux. Il a rendu compte en ces termes des premiers résultats de ses travaux, qui, dans leur ensemble, ont heureusement complété ceux de Cagniard de Latour : « Si on liquéfie partiellement de l'acide carbonique par l'action de la pression seule, et qu'on élève en même temps sa température jusqu'à 88° F. (31° centigr.), on voit la surface de séparation entre le liquide et le gaz devenir indécise, perdre sa courbure, puis finir par disparaître complètement. La capacité de l'appareil est alors remplie par un fluide homogène qui manifeste, lorsqu'on diminue brusquement la pression ou qu'on abaisse légèrement la température, des apparences de stries mobiles[1], ondoyant au travers de sa masse tout entière. Si la température s'élève au-dessus de 88° F., la liquéfaction apparente de l'acide carbonique, c'est-à-dire la séparation de cette substance en deux états distincts, devient impossible, même en

1. D'après des recherches récentes dues à MM. Cailletet et Hautefeuille, ces stries ne seraient autre chose que des traînées d'acide carbonique liquéfié (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1881). Un physicien anglais, M. Hannay, avait constaté le même fait en 1880, et établi « que jusqu'à la pression de 300 atmosphères, le ménisque d'un liquide disparaît à la même température que quand il est soumis à la pression de sa propre vapeur, ce qui démontre que l'état liquide finit à la température critique, quelle que soit la pression ». (*Ibid.*)

ayant recours à des pressions de 300 à 400 atmosphères. Le protoxyde d'azote donne des résultats du même genre. »

Il paraissait donc qu'il y avait, tout au moins pour le gaz acide carbonique, une limite de température au-dessus de laquelle ce gaz n'est plus liquéfiable par simple compression. Mais M. T. Andrews a étendu l'étude de cette particularité si intéressante à d'autres gaz pour lesquels il a également trouvé une pareille limite. Il a donné le nom de *point critique* à cette température qui varie d'une substance à l'autre.

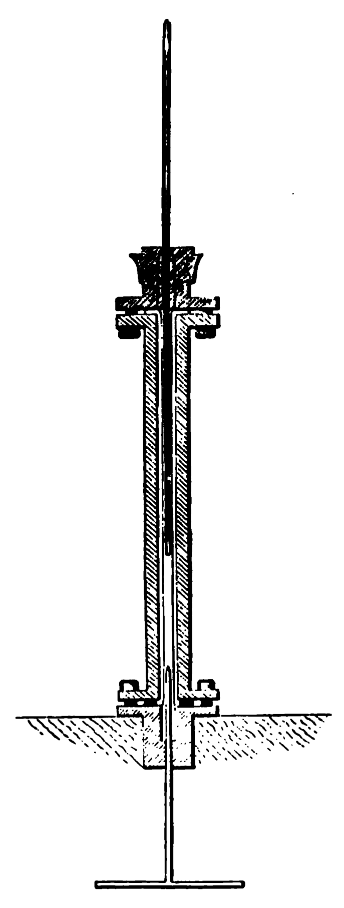


Fig. 112. — Appareil d'Andrews pour l'étude de la compressibilité des gaz.

Pour étudier la loi de la compressibilité des gaz quand on fait varier la pression et la température, le savant physicien anglais s'est servi d'un appareil dont la figure 112 servira à faire comprendre le fonctionnement. Le gaz parfaitement desséché et purgé d'air était introduit dans un tube à parois épaisses et à diamètre capillaire fermé par un bout; une petite colonne de mercure l'isolait de l'extrémité ouverte du tube qui, dans cette moitié de sa longueur, avait un diamètre double de l'autre. Le tube était gradué avec soin en parties d'égale capacité dans toute sa longueur, de façon qu'on pouvait à tout instant mesurer le volume du gaz avec une rigoureuse exactitude. Puis il était engagé dans un tube de cuivre garni de deux montures à vis, dont l'une laissait passer la partie capillaire du tube de verre, tandis que l'autre portait une vis d'acier. Les montures et la vis étaient soigneusement garnies de façon à empêcher toute fuite,

sous les pressions les plus considérables. On remplissait d'eau l'appareil avant qu'il fût vissé, et la pression s'obtenait en faisant pénétrer dans cette eau la vis d'acier : la pression se communiquait au gaz par l'intermédiaire de l'index mobile de mercure.

Pour faire une expérience, la partie capillaire du tube était entourée d'un manchon rectangulaire en laiton dont deux faces opposées étaient formées de glaces transparentes ; un courant

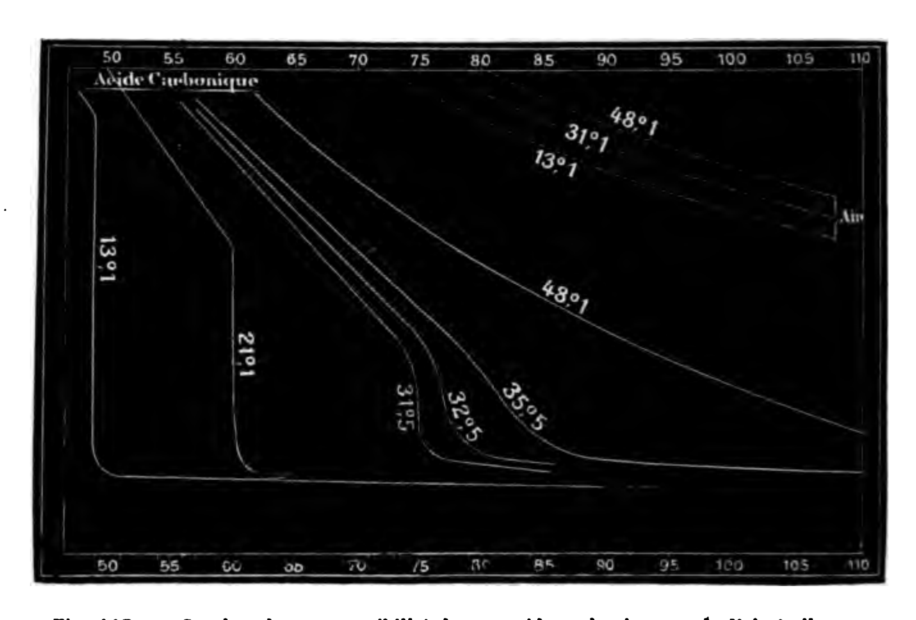


Fig. 113. — Courbes de compressibilité du gaz acide carbonique et de l'air à diverses températures, d'après Andrews.

d'eau continu passant dans le manchon permettait de maintenir le gaz à toute température voulue. Quant au corps de l'appareil lui-même, il était renfermé dans un vase extérieur de cuivre, rempli d'eau à la température ambiante.

M. Andrews a représenté par des courbes les résultats de ses expériences : un coup d'œil jeté sur la figure 113 où ces courbes sont tracées pour l'acide carbonique et pour l'air, aidera à en faire saisir le caractère. Les abscisses de ces courbes représentent les pressions en atmosphères, et les ordonnées sont les volumes correspondants du gaz pour une température

déterminée, le volume initial étant le même pour chaque température spéciale.

Au-dessous du point critique, c'est-à-dire de la température de 30°,9, les courbes se rapprochent de l'axe des x plus rapidement que celles de l'air, jusqu'au moment où l'on atteint la pression qui correspond au point de liquéfaction. Là se voit une soudaine diminution des ordonnées, c'est-à-dire du volume du gaz. Pour les températures supérieures au point critique, mais encore voisines de lui, le volume diminue d'abord avec assez de régularité, puis il subit encore une dépression brusque, suivie d'une diminution plus lente; mais la dépression est de moins en moins accusée à mesure que la température augmente, et on peut voir qu'elle n'existe plus dans la courbe donnant les résultats obtenus pour 48°. Au-dessus de cette température, M. Andrews n'a pas fait d'expériences; mais, comme il le dit fort bien, il est clair que, tant que la température s'élève, la courbe doit continuer à s'approcher de celle qui représente les changements de volume d'un gaz parfait.

La conclusion que ce savant physicien a tirée de ces remarquables expériences, c'est que la transition entre l'état gazeux et l'état liquide d'un même corps peut s'opérer d'une manière pour ainsi dire insensible, c'est que, dans certaines conditions de pression et de température, les caractères de ces deux états ne sont pas assez tranchés pour qu'on ne puisse les confondre. « Les états gazeux et liquide ordinaires ne sont au fond, selon M. Andrews, que des formes largement séparées d'un même état de la matière, et ils peuvent passer de l'un à l'autre par une série de gradations si douces, que le passage ne présente en aucun point d'interruption ni de solution de continuité. Depuis l'acide carbonique, gaz parfait, jusqu'à l'acide carbonique, liquide parfait, la transition peut s'accomplir par un procédé continu; le gaz et le liquide ne sont que des termes éloignés d'une longue série de changements physiques continus. Sous certaines conditions de température et de pression, l'acide carbonique se trouve, il est vrai, dans ce que l'on pourrait

décrire comme un état d'instabilité, et il passe brusquement, avec développement de chaleur, et sans application de pression additionnelle ou changement de température, au volume qu'il aurait pu atteindre seulement en suivant la route longue et détournée d'un procédé continu. Dans le changement rapide qui se produit alors, une différence marquée se manifeste, pendant que se produit le phénomène, entre les caractères optiques et les autres propriétés physiques de l'acide carbonique qui s'est abaissé au volume le plus petit, et ceux de l'acide carbonique non encore transformé; il n'y a donc pas de difficulté dans ce cas à faire la distinction entre le liquide et le gaz. Mais dans certains autres cas cette distinction devient impossible; et dans beaucoup des conditions que j'ai décrites, on essayerait en vain d'assigner à l'acide carbonique l'état liquide plutôt que l'état gazeux[1]. »

Toutefois ces conclusions paraissent infirmées par de récentes expériences dues à un autre physicien anglais, M. Hannay. D'après ce savant, « la continuité des états liquide et gazeux énoncés par M. Andrews n'est qu'apparente »; un très grand nombre d'expériences, l'amènent à affirmer que, « quel que soit le degré de pression, l'état liquide cesse à la température critique et que l'état gazeux survient alors ».

La considération du point critique a fourni à M. Andrews un moyen de définir d'une façon plus précise la différence à établir entre un gaz et une vapeur. Cette distinction a été fondée jusqu'ici, selon lui, sur des principes entièrement arbitraires. On appelle *vapeur* l'éther à l'état gazeux, tandis que l'acide sulfureux dans le même état se nomme *un gaz*. Tous deux cependant sont des vapeurs émanées, la première d'un liquide qui bout à $+35°$, la seconde d'un liquide qui bout à $-10°$. La distinction n'est donc basée que sur une condition toute relative, la position du point d'ébullition au-dessus ou au-dessous de la température ordinaire; elle n'a pas de valeur

1. Thomas Andrews, *Continuité des états liquides et gazeux de la matière*, lecture bakérienne à la Société royale de Londres.

scientifique. « Le point critique de température, dit-il, nous fournit un critérium pour distinguer un gaz d'une vapeur, si l'on croit important de conserver cette distinction. Beaucoup des propriétés des vapeurs dépendent de la présence simultanée du gaz et du liquide au contact l'un de l'autre; or nous avons vu que cette présence simultanée ne peut exister que lorsque la température est au-dessous de son point critique. Nous pouvons donc définir une vapeur : un gaz à toute température au-dessous de son point critique. D'après cette définition, une vapeur peut, sous l'action de la pression seule, se transformer en liquide; un gaz, au contraire, ne peut pas être liquéfié par pression, de manière à devenir un liquide visible, se distinguant de *son* gaz par une surface de séparation. Si l'on accepte cette définition, l'acide carbonique sera une vapeur au-dessous de 31°, un gaz au-dessus de cette température; l'éther sera une vapeur au-dessous de 200°, et un gaz au-dessus[1]. »

En rapprochant ces vues, suggérées par des expériences positives, des remarques de Thilorier sur la grande dilatation de l'acide carbonique liquide, des recherches de Drion sur le rapide accroissement de la dilatation des liquides volatils avec la température, des expériences de Natterer sur la compressibilité des gaz qui décroît à mesure que la pression augmente, on est amené à les considérer comme exactes, et si la continuité des états de la matière reste un point douteux et controversé, il n'en est pas de même de l'existence du point critique, dont la considération, depuis les travaux de M. Andrews, a eu une réelle importance, puisqu'elle a nettement montré aux expérimentateurs la cause de l'insuccès de leurs tentatives pour liquéfier les derniers gaz permanents. Les énormes pressions auxquelles ces gaz avaient été soumis étaient insuffisantes, parce que la température, quelque basse qu'elle fût, dépassait encore celle de leurs points critiques. Les moyens si énergiques

1. Th. Andrews, *loc. cit.*

décrire com… …ent certains mélanges réfrigé-
avec dév… …nique et l'éther, n'étaient pas
addition… …que la compression pût amener
aurait … il fallait trouver un moyen nouveau
déto… … ce problème a été résolu simulta-
qu… …années à peine par deux procédés dis-
p… …ailletet et l'autre à M. Raoul Pictet.

…CTION DES DERNIERS GAZ DITS PERMANENTS.

… …urant de novembre 1877, un savant français, … …ongtemps par ses études sur la compressibilité … …etet, annonçait à l'Académie des sciences qu'il … …uéfier l'acétylène. « L'appareil que j'emploie, dit-il, … …rvir également à la liquéfaction d'un grand nombre … …mpose d'un cylindre creux en acier, sorte d'éprou… …versée, dont les parois sont assez épaisses pour … à la pression de plusieurs centaines d'atmosphères. … supérieure de l'appareil porte un pas de vis qui … d'y fixer, au moyen d'un écrou de bronze, le réservoir … …rre qui contient le gaz à liquéfier. Ce réservoir est formé … tube épais et de petit diamètre, soudé à un tube plus …ge qui plonge dans le mercure dont on a rempli le cylindre …eux.

« L'éprouvette est donc soumise, à l'intérieur et à l'extérieur, à des pressions égales, ce qui permet de lui donner des dimensions notables, malgré les hautes pressions qu'elle devra supporter : quant au tube de petit diamètre qui la surmonte, il est soumis intérieurement aux pressions qui déterminent la liquéfaction, tandis que ses parois extérieures supportent seulement la pression atmosphérique. Un épaulement de métal livre passage au tube de petit diamètre qui s'y trouve mastiqué ; ce tube s'élève verticalement, ce qui permet de suivre à l'œil nu toutes les phases de la liquéfaction : pour plus de

sécurité, il est bon d'entourer cette partie de l'appareil d'un cylindre plus large rempli d'eau.

« On comprime le gaz au moyen d'une pompe hydraulique par l'intermédiaire d'une couche de mercure[1]. »

En soumettant l'acétylène à une pression de 83 atmosphères à la température de + 18°, M. Cailletet vit de nombreuses gouttelettes se former et couler contre les parois inférieures du tube. Refroidi à 0°, le liquide se transforma en un composé blanc, neigeux, qui se détruisait en dégageant de nombreuses bulles de gaz quand on le chauffait légèrement ou qu'on abaissait la pression. L'hydrure d'éthylène s'était pareillement liquéfié à 46 atmosphères, à la température de + 4°.

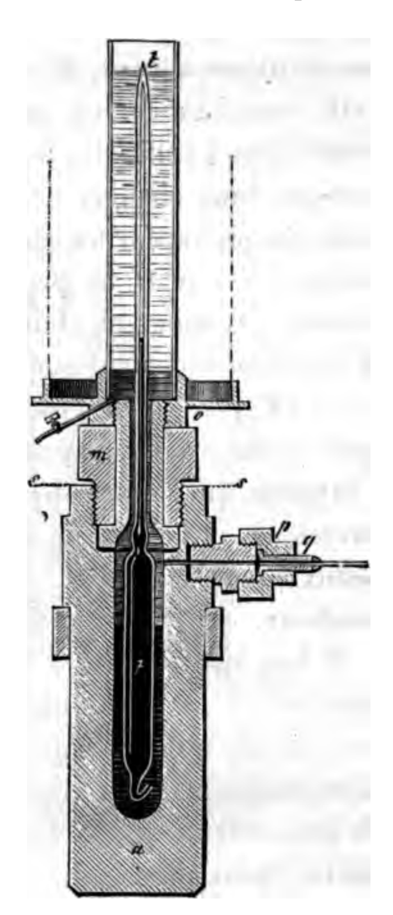


Fig. 114. — Coupe de l'appareil compresseur de M. Cailletet.

Ce n'était que le prélude de succès plus décisifs. En effet, moins d'un mois après cette communication, M. Cailletet parvenait à liquéfier le bioxyde d'azote, en le comprimant à 104 atmosphères, la température étant de — 11°. A + 8°, ce corps était resté gazeux sous la pression de 270 atmosphères. M. Berthelot, en faisant part de ce résultat à l'Académie, insistait en ces termes sur cette nouvelle conquête de la science : « Cette découverte, dit-il, offre une importance exceptionnelle, parce qu'elle fait avancer la science au delà d'une limite atteinte il y a cinquante ans par Faraday, qui le premier réus-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1877, t. II (séance du 5 novembre).

sit à liquéfier des gaz permanents. Jusqu'ici aucun des gaz qui obéissent sans écart sensible à la loi de Mariotte, au voisinage de la pression normale, n'avait pu être liquéfié, malgré les tentatives réitérées des expérimentateurs les plus habiles. J'avais moi-même poussé la compression de quelques-uns de ces gaz jusque vers 800 atmosphères, mais sans succès. Dans les dernières années, M. Andrews nous a montré la raison de cette impuissance, en rattachant les propriétés des gaz non liquéfiables à celles des liquides qui se vaporisent entièrement, presque sans changer de volume. Il existe, dit M. Andrews, pour chaque vapeur *un point critique* de température, au-dessus duquel la vapeur ne peut être ramenée à l'état liquide par aucune pression, si grande qu'elle soit. Les expériences de M. Cailletet montrent que ce point critique est situé entre +8° et —11° pour le bioxyde d'azote. Il me paraît bien probable que la plupart des gaz non liquéfiés jusqu'à présent, tels que l'oxygène, qui s'écarte déjà de la loi de Mariotte sous les grandes pressions, et l'oxyde de carbone, ne résisteront pas aux nouveaux procédés que M. Cailletet met en œuvre avec tant de bonheur. »

Il faut ajouter que le formène pur, comprimé à 180 atmosphères à 7°, avait donné naissance à un brouillard, qui apparaissait dès qu'une diminution brusque de pression avait lieu. C'est en profitant du refroidissement considérable qui résulte de cette détente que M. Cailletet réalisa la prédiction de M. Berthelot. Nous allons voir l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, céder à l'emploi de ce moyen.

Dans la séance de l'Académie du 24 décembre 1877, séance qui restera mémorable dans l'histoire de la science, deux communications furent faites simultanément sur ce même important sujet. M. Cailletet annonçait la liquéfaction de l'oxygène et celle de l'oxyde de carbone, et M. Raoul Pictet adressait de Genève au Président de l'Académie la courte dépêche qui suit : « Oxygène liquéfié aujourd'hui (22 décembre) sous 300 atmosphères et 140 de froid par acides sulfureux et carbonique

accouplés. » Les expériences de M. Cailletet avaient précédé de quelques jours celles du savant génevois, de sorte que la priorité revient incontestablement à notre compatriote; mais, ainsi que M. Henri Sainte-Claire Deville en fit l'observation, « le travail remarquable de M. Raoul Pictet n'en reçoit aucune atteinte », les modes opératoires des deux physiciens étant absolument différents, comme nous allons le voir tout à l'heure, en décrivant les appareils de M. Pictet.

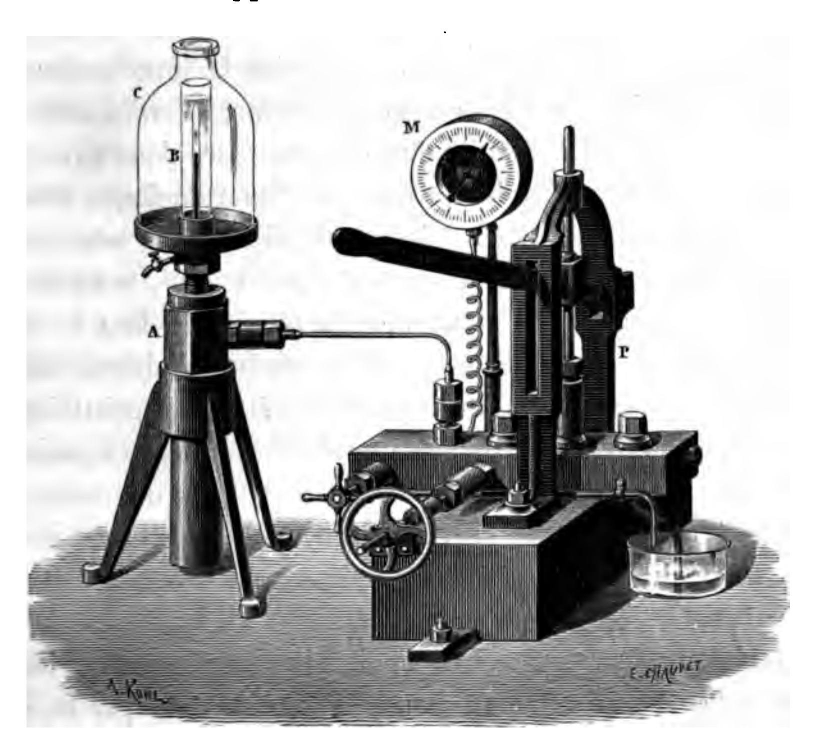


Fig. 115. — Appareil de M. Cailletet pour la liquéfaction des gaz.

C'est encore à la détente brusque de la compression que M. Cailletet avait eu recours pour obtenir l'abaissement de température nécessaire à la liquéfaction. Comprimés à 300 atmosphères, à —29° (froid produit au moyen de l'acide sulfureux), l'oxygène et l'oxyde de carbone avaient conservé également leur état gazeux. « Mais si on les détend subitement, ce qui doit produire, d'après la formule de Poisson, une température d'au moins 200 degrés au-dessous du point de départ,

on voit apparaître immédiatement un brouillard intense, produit par la liquéfaction et peut-être par la solidification de l'oxygène ou de l'oxyde de carbone. Ce brouillard se produit pour l'oxygène, même lorsque ce gaz est à la température ordinaire, pourvu qu'on lui laisse le temps de perdre la chaleur qu'il acquiert par le fait seul de la compression. »

Dans les mêmes conditions de température et de pression, M. Cailletet ne put d'abord rien obtenir de l'hydrogène; la détente même la plus rapide ne donna aucune trace de matière nébuleuse. Peu de temps après, il obtint la liquéfaction de l'azote, puis celle de l'hydrogène lui-même, et enfin celle de l'air, qui ne pouvait d'ailleurs être douteuse, ses deux gaz constituants ayant été séparément liquéfiés. Voici quelques détails sur ces nouveaux résultats. C'est à $+ 13°$ et sous une pression de 200 atmosphères que l'azote pur et sec, subitement détendu, se condense de la manière la plus nette dans le tube à expérience de M. Cailletet. « Il se produit d'abord, dit-il, une matière semblable à un liquide pulvérisé, en gouttelettes d'un volume appréciable, puis ce liquide disparaît peu à peu des parois vers le centre du tube, en formant à la fin une sorte de colonne verticale dirigée suivant l'axe du tube lui-même. La durée totale du phénomène est d'environ trois secondes. »

L'hydrogène pur, comprimé vers 280 atmosphères, puis brusquement détendu, donna « un brouillard excessivement fin et subtil, suspendu dans toute la longueur du gaz et qui disparaissait subitement ». D'après M. Berthelot, qui fut témoin, avec MM. H. Sainte-Claire Deville et Mascart, de ces intéressantes expériences, la liquéfaction de l'hydrogène n'était pas douteuse, bien que les signes en fussent moins complets et plus difficiles à saisir que pour l'azote. Ce qui, d'après le même savant, dont l'opinion a une si haute valeur, donne aux expériences de M. Cailletet « leur caractère et leur certitude propre; c'est qu'elles manifestent et permettent de comparer, *dans un même état transparent et limité*, le gaz *sous ses trois états successifs* de fluide élastique comprimé, de liquide pulvérisé,

et de fluide en grande partie détendu. Ajoutons la facilité avec laquelle chaque expérience peut être répétée aussitôt, et autant de fois qu'on le désire, de façon à reproduire et à étudier séparément les diverses circonstances du phénomène. »

Nous venons de dire que M. Cailletet avait obtenu des indices de liquéfaction de l'air. Une nouvelle expérience lui permit de dire qu'il l'avait solidifié. Voici les détails de cette double transformation. » J'ai enfermé, dit-il, dans le tube de verre de mon appareil à pression, de l'air sec et dépouillé d'acide carbonique, j'ai refroidi avec du protoxyde d'azote la partie supérieure du tube *seulement*. Quand la pression a été de 200 atmosphères, j'ai vu couler sur les parties inférieures du tube des *filets* sans aucun doute liquides. Ils semblaient très agités. L'éther, en coulant dans un tube, produit le même effet. Lorsque ces filets arrivaient au contact du mercure qui se trouvait alors à quelques centimètres au-dessous du réfrigérant, ils semblaient rebrousser chemin. J'ai comprimé jusqu'au moment où le mercure allait pénétrer dans l'appareil réfrigérant ; ce point était déjà très froid, à en juger par le dépôt de glace qui se formait sur le tube. La pression était de 255 atmosphères. Les filets liquides augmentaient sensiblement et devenaient bien plus visibles.

« J'ai porté enfin la pression à 310 atmosphères. Le mercure était au contact de la partie du tube refroidie par le protoxyde d'azote, il était gelé. J'ai enlevé alors rapidement l'appareil réfrigérant, et j'ai vu le sommet de la colonne de mercure recouvert de givre ; c'était sans doute de l'air gelé. J'ai cru même voir un liquide pendant un instant, au moment où le mercure allait reprendre l'état liquide[1]. »

De l'air gelé ! Quelle éclatante justification de la prédiction de Lavoisier, rappelée dans le courant de ce chapitre !

Arrivons maintenant aux belles expériences de M. Raoul Pictet.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1878, t. I.

La méthode adoptée par ce savant n'est, comme celle de M. Cailletet, que la combinaison des deux moyens de condensation jusqu'alors employés dans toutes les expériences de liquéfaction : l'abaissement de la température du gaz à liquéfier; l'action simultanée des plus fortes pressions possibles. En évaporant dans le vide de l'acide sulfureux liquide, M. Pictet obtient une première chute de température (de —65° ou — 73°), qu'il utilise pour préparer des masses d'acide carbonique liquide, ou de protoxyde d'azote liquide, sous une pres-

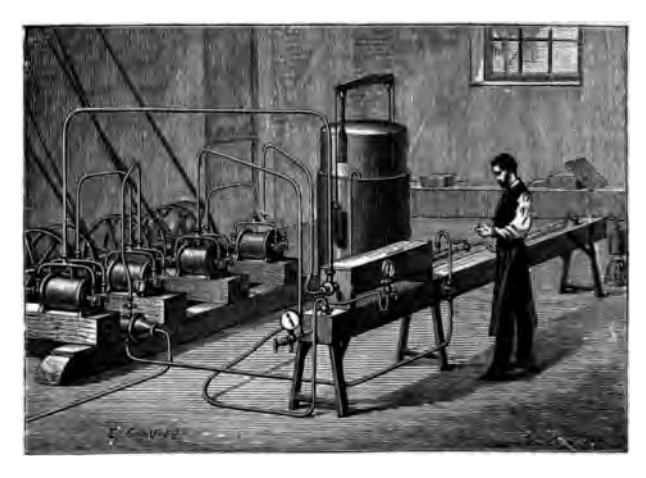


Fig. 116. — Vue d'ensemble des appareils de M. Raoul Pictet.

sion de 4 à 6 atmosphères seulement. L'évaporation dans le vide de l'un ou l'autre de ces gaz liquéfiés détermine une seconde chute de température, qui permet d'obtenir, tout autour du tube renfermant le gaz en expérience, un froid de —120° à —140°. Enfin, la détente brusque de la haute pression du gaz à la pression atmosphérique vient ajouter son influence, pour abaisser encore la température et amener la liquéfaction ou même la solidification. Telle est, d'une manière générale, la partie de la méthode de M. Pictet qui a pour objet de soumettre le gaz à un refroidissement assez grand pour que la température tombe au-dessous du point critique propre à ce gaz. Quant à la pression, ce n'est point à des moyens mécaniques qu'il la demande; le gaz, en se produisant et se déga-

geant en espace clos, sous l'action de la chaleur, se comprime lui-même.

Disons maintenant comment ont été disposés les appareils propres à réaliser les opérations indiquées par la méthode que nous venons de résumer dans ses traits essentiels. Pour arriver à la liquéfaction des gaz permanents, ces appareils devaient, d'après l'auteur lui-même, remplir les conditions suivantes : « 1° agir sur un gaz *absolument pur*, sans aucune trace de gaz étranger ; 2° disposer d'une compression méthodique de ce gaz, pouvoir atteindre des pressions énergiques, et pouvoir mesurer ces pressions exactement ; 3° avoir à sa disposition les températures les plus basses possibles et pouvoir les maintenir indéfiniment tout en soustrayant de la chaleur à ces basses températures ; 4° disposer d'une grande surface de condensation maintenue à ces basses températures ; 5° pouvoir utiliser la détente des gaz de la pression considérable à la pression atmosphérique, détente qui, s'ajoutant aux moyens précédents, *oblige* la liquéfaction[1]. »

Cela posé, décrivons les appareils et les opérations nécessaires, par exemple, pour la liquéfaction de l'oxygène. Suivons pour cela les détails des figures 117 et 118, dont l'une représente le plan et la seconde l'élévation des appareils de M. Pictet.

La préparation de l'oxygène se fait dans le vase B. C'est un obus en fer forgé de 1659 centimètres cubes de capacité, et dont les parois ont une épaisseur moyenne de 35 millimètres, pouvant résister à une pression de plus de 1500 atmosphères. On y introduit un poids connu d'un mélange de chlorate de potasse et de chlorure de potassium. Sous l'obus on dispose alors une couronne de gaz, telle qu'on en emploie dans les fours Perrot. En allumant et réglant la flamme, on amène progressivement l'obus aux 485 ou 500 degrés nécessaires pour le dégagement complet de l'oxygène. Le gaz produit se rend, de l'obus B, dans un tube en cuivre A, d'un peu plus de 4 mètres de longueur,

1. *Mémoire sur la liquéfaction de l'oxygène*, par Raoul Pictet.

de 4 millimètres de diamètre intérieur et de 15 millimètres de diamètre extérieur, offrant ainsi une grande résistance et une surface considérable.

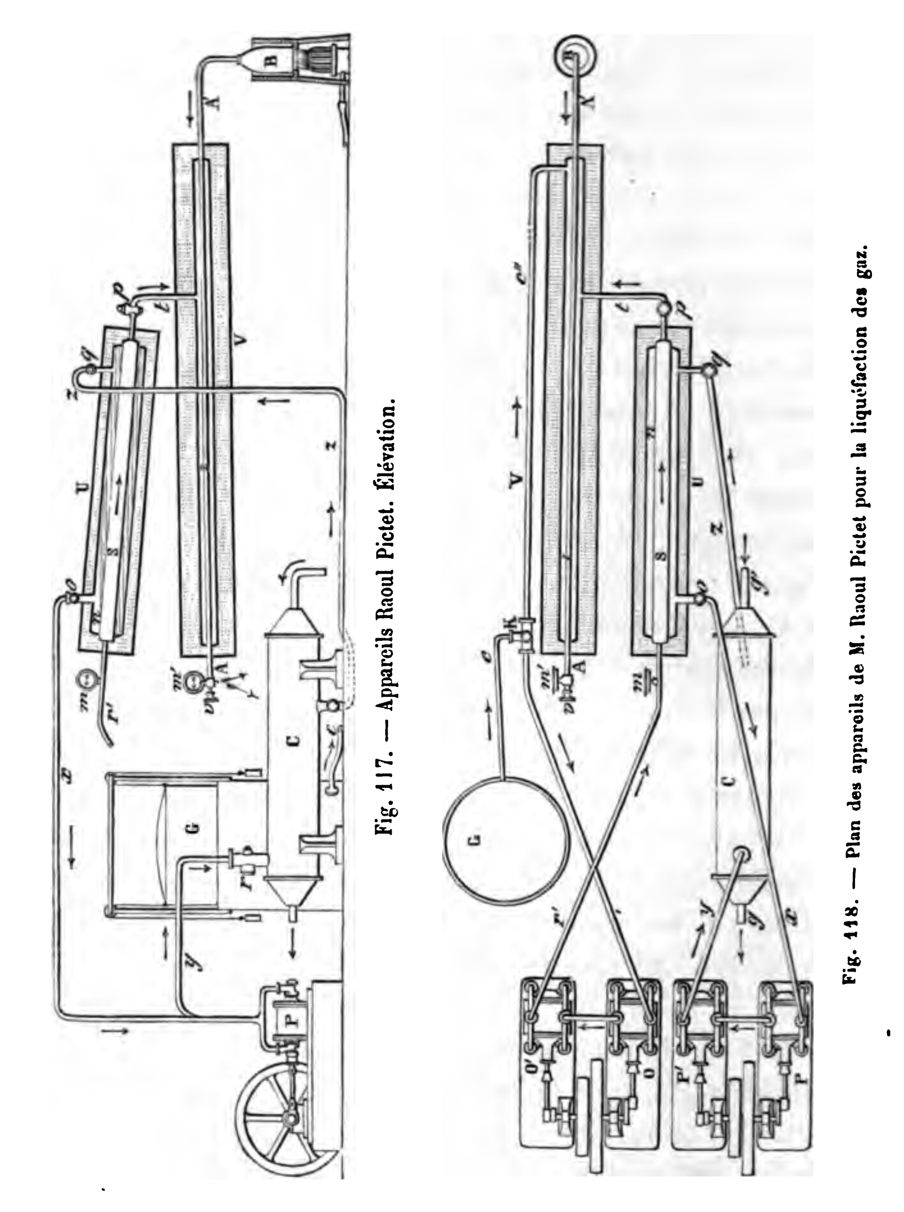


Fig. 117. — Appareils Raoul Pictet. Élévation.

Fig. 118. — Plan des appareils de M. Raoul Pictet pour la liquéfaction des gaz.

C'est dans ce tube que l'oxygène se comprime par sa propre formation. Un manomètre m', adapté à un orifice pratiqué près de l'extrémité opposée à l'obus, donne la mesure directe de la pression du gaz : il est gradué de manière à indiquer jusqu'à

800 atmosphères. Le tube A contenant le gaz oxygène est entouré, sur un peu plus des quatre cinquièmes de sa longueur, par un second tube *i* de plus grand diamètre, qui reçoit, par le tuyau *t*, l'acide carbonique provenant du réservoir S. C'est le froid intense produit par l'évaporation de ce liquide qui, abaissant la température du tube A et de l'oxygène qu'il contient, va déterminer la condensation et la liquéfaction de ce gaz.

Mais comment l'acide carbonique liquide a-t-il été produit et par quel procédé obtient-on son évaporation dans le réservoir S? C'est ce qu'il nous reste à faire voir. Nous avons dit que l'abaissement de température nécessaire à la liquéfaction de l'acide carbonique s'obtenait par l'évaporation de l'acide sulfureux. A cet effet, dans une caisse U, située au-dessus de la caisse V qui renferme le tube à oxygène, est disposé un grand tube *n* enveloppant le réservoir S destiné à recevoir l'acide carbonique liquide. C'est ce tube qui reçoit l'acide sulfureux ; il est muni de deux tuyaux de communication *z* et *x*, le premier servant à l'introduction de l'acide sulfureux liquide comprimé par une pompe P′ dans le condenseur en forme de chaudière tubulaire C, le second faisant le vide sur l'acide sulfureux du tube *n* par l'action d'une seconde pompe P accouplée à la première. L'association des deux pompes P et P′ est telle, que l'aspiration de la seconde se fait au même moment que la compression de la première. L'acide sulfureux qui s'évapore dans le tube *n* passe par le robinet *o*, se rend dans la première pompe P, de là dans la seconde, qui le refoule par *y* dans le condenseur. Là, la vapeur repasse à l'état liquide. Comme le robinet de réglage *q*, par où s'introduit l'acide sulfureux liquide, est ouvert de façon à en laisser écouler une quantité égale à celle qui s'évapore par *o*, il en résulte que le niveau du liquide dans le tube *n* est constant. On voit déjà comment, par suite de cette évaporation, se produit autour du tube S la première chute de température, à —65° ou —73° au plus.

Un second système O et O′ de pompes accouplées sert à la

condensation de l'acide carbonique et à son évaporation. Ce gaz est fabriqué dans deux grands bocaux en verre remplis de fragments de marbre de Carrare, sur lesquels on fait arriver de l'acide chlorhydrique. Le gaz produit, lavé et desséché au chlorure de calcium, est emmagasiné dans un gazomètre G, puis aspiré par le jeu des pompes O et O' et comprimé dans le tube S, où la basse température que provoque l'évaporation de l'acide sulfureux, le liquéfie aisément. On peut en accumuler ainsi 2 kilogrammes en moins d'un quart d'heure. Nous avons déjà vu comment par le tuyau *t* l'acide carbonique liquide s'introduit dans le long tube qui enveloppe le tube à oxygène. Quand ce dernier est rempli, on tourne un robinet à trois voies K, et l'aspiration de la pompe O se produit alors, par les tuyaux *c* et *c''*, à la partie supérieure du tube. Le vide se fait à la surface de l'acide carbonique liquide, qui se congèle, et la seconde chute de température, à —120° ou —130°, a lieu tout autour du tube qui renferme le gaz oxygène.

Nous avons laissé de côté, dans cette description, beaucoup de détails qui ont certainement dans la pratique une grande importance, mais qui nous eussent entraîné dans des longueurs non indispensables pour l'intelligence des expériences.

Disons maintenant, en citant l'auteur lui-même, à quels résultats il est parvenu. La première expérience décisive ayant pour objet la liquéfaction de l'oxygène eut lieu le 22 décembre 1877. En voici les diverses phases; nous croyons que le lecteur en lira le détail avec intérêt, puisqu'il y retrouvera les opérations successives décrites plus haut et l'ordre dans lequel elles doivent se suivre :

« Les pompes sont mises en action vers neuf heures du matin. La température s'abaisse rapidement dans le tube *n*.

« 9h 30m. La température est —55°. On met les pompes d'acide carbonique en fonctionnement. Le gazomètre descend. Pression de l'acide carbonique, 6 atmosphères. Elle monte lentement pendant la marche jusqu'à 8 atmosphères.

« 9h 50m. La température est —49°, la pression 8,5 atmo-

sphères. Je ferme l'admission de l'acide carbonique aux pompes.

« 10^h20^m. Température —65°, pression 3,9 atmosphères. Je rouvre l'admission du gaz, mais légèrement.

« 10^h40^m. Température —60°, pression 5 atmosphères. 800 litres de gaz acide carbonique sont déjà liquéfiés. Le givre couvre le bas du manomètre *m'* à oxygène.

« 10^h50^m. On visse l'obus au tube A. L'obus est chargé de 700 grammes de chlorate de potasse mélangé à 250 grammes

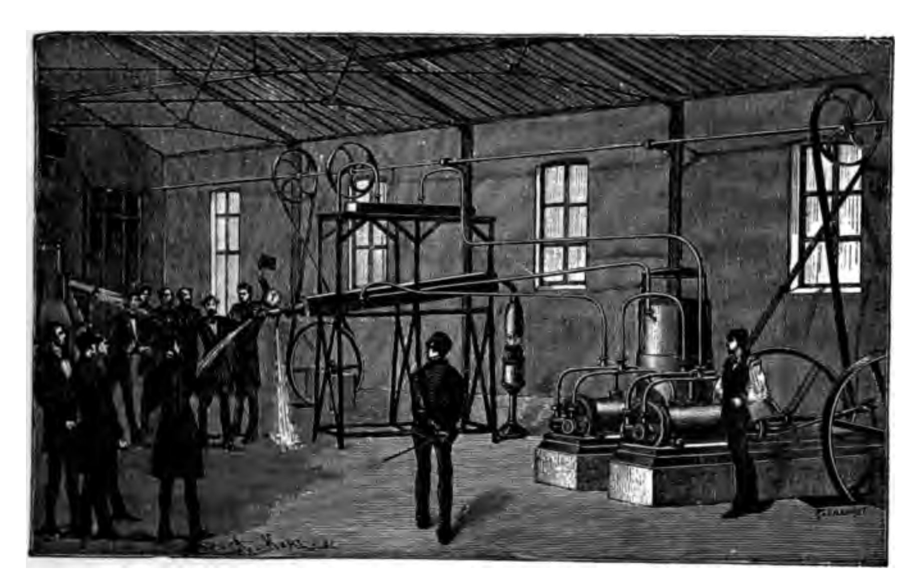


Fig. 119. — Liquéfaction de l'oxygène par M. Raoul Pictet.

de chlorure de potassium pilés ensemble, tamisés et parfaitement desséchés.

« 11^h. On allume la couronne de gaz sous l'obus. L'acide carbonique est introduit plus abondamment dans les pompes. La pression monte à 10 atmosphères, température —48°. On est certain que l'acide carbonique a passé en totalité dans le long tube *i*, parce que le givre apparaît sur le tube *c''* qui débouche au haut du tube *i*.

« 11^h15^m. On met en communication le tube *c''* avec l'aspiration des pompes, la température de l'acide carbonique devient un minimum, —130°.

« $11^h 35^m$. Le manomètre de l'oxygène indique un commencement de pression, environ 5 atmosphères. Le régime des deux circulations d'acide sulfureux et d'acide carbonique est parfaitement établi.

« $12^h 10^m$. Le manomètre à oxygène marque 50 atmosphères.

« $12^h 16^m$. La pression monte à 60 atmosphères, puis s'élève progressivement. (Elle atteignit le maximum de 526 atmosphères à $12^h 42^m$, pour redescendre à 470 atmosphères à $1^h 10^m$, où elle resta stationnaire.)

A ce moment, ajoute M. Pictet, tous les phénomènes physiques et chimiques de l'expérience sont terminés, et toute la capacité intérieure du tube A est pleine d'oxygène liquide. Pour le rendre manifeste, il fait alors agir la détente en ouvrant le robinet à vis R qui ferme ce tube (fig. 119 et 120). « Un jet liquide J sort avec une grande violence et revêt l'apparence d'un pinceau blanc éclatant. Une auréole bleuâtre entoure ce jet, surtout dans la partie inférieure. La longueur du pinceau liquide est d'environ 10 à 12 centimètres sur un diamètre de 1,5 à 2 centimètres. Le jet dure 3 ou 4 secondes environ. » Après avoir refermé le robinet et constaté l'abaissement de la pression à 352 atmosphères, où elle demeure de nouveau stationnaire pendant environ 3 minutes, M. Pictet ouvrit à nouveau le robinet et un second jet liquide sortit,

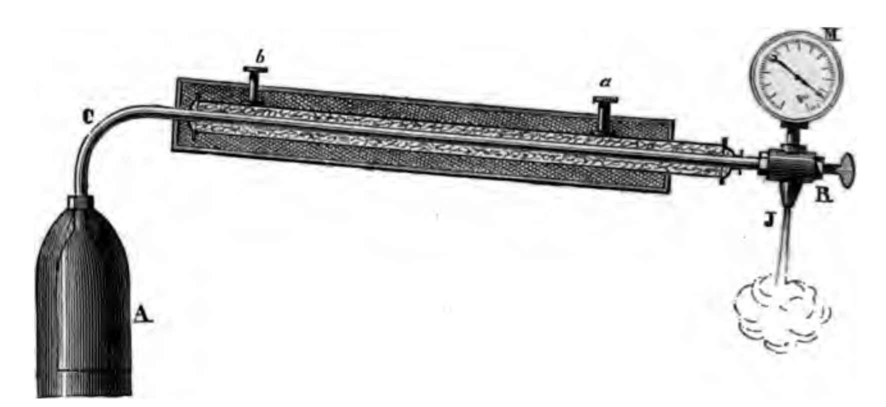


Fig. 120. — Liquéfaction de l'oxygène par M. Raoul Pictet.

semblable au premier. Après cela, le gaz, continuant de se détendre, ne donna plus qu'un fort brouillard par sa condensation partielle. En examinant, à l'aide de la lumière électrique condensée par un réflecteur, l'apparence des jets à l'orifice de sortie, M. Pictet a distingué nettement dans la veine fluide deux parties : l'une centrale, assez diaphane, ayant 2 à 3 millimètres de diamètre; l'autre, d'un blanc éclatant, enveloppant la première, ayant de 10 à 15 millimètres. M. H. Dufour, ayant étudié cette lumière blanche avec un prisme de Nicol, y saisit des indices de polarisation, ce qui ferait croire, ajoute M. Pictet, « que l'oxygène, au sortir du tube, se volatilise avec une telle énergie que les particules liquides sont transformées en petits cristaux solides, vraie poussière d'*oxygène gelé*. La chaleur de l'air ambiant retransforme presque instantanément ces cristaux en gaz. »

Voici maintenant les résultats obtenus par le même savant sur le gaz hydrogène, dans le courant de janvier 1878. Le gaz était produit par la réaction du formiate de potasse et de la potasse caustique, chauffés dans l'obus de l'appareil décrit plus haut. L'expérience est rapportée en ces termes dans une lettre de M. Raoul Pictet, adressée le 11 janvier à M. Dumas, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences :

« L'hydrogène s'est dégagé avec une régularité parfaite. La pression a atteint 650 atmosphères avant de devenir stationnaire. Le dégagement de l'hydrogène correspondait à 252 litres à zéro. Le froid était de —140° environ. Lorsque j'ouvris le robinet de fermeture, l'hydrogène liquide sortit avec véhémence de l'orifice, en faisant entendre un son aigu de sifflement. Le jet eut une couleur bleu-acier et fut complètement opaque sur une longueur d'environ 12 centimètres. Au même moment, on entendit sur le sol un crépitement semblable au bruit que fait de la grenaille qui tombe à terre, et le sifflement se transforma en un bruissement très particulier, ressemblant à celui que fait entendre un morceau de sodium jeté sur l'eau.

« Presque aussitôt, le jet devint intermittent, et l'on sentit

des secousses dans le robinet à chaque sortie. La pression baissa, durant ce premier jet, de 650 atmosphères à 370. Après la fermeture, la pression baissa graduellement durant plusieurs minutes jusqu'à 215 atmosphères, puis elle remonta lentement jusqu'à 225, où elle fut de nouveau stationnaire. Je rouvris le robinet, mais le jet sortit d'une manière si intermittente, qu'il était évident que la congélation de l'hydrogène s'était opérée dans le tube. Cette hypothèse fut démontrée par la sortie progressive de tout l'hydrogène, lorsque j'eus arrêté les pompes et la production du froid. »

En comprimant un mélange d'ozone et d'oxygène, maintenu à — 23° dans le tube capillaire de l'appareil Cailletet, MM. Hautefeuille et Chapuis ont observé dans le tube une couleur bleu d'azur, qui passe au bleu indigo quand on augmente la pression. Une brusque détente succédant à une compression de 75 atmosphères a donné lieu à la formation momentanée d'un brouillard, signe manifeste d'une liquéfaction ou même d'une congélation. En mélangeant à l'oxygène ozonisé du gaz acide carbonique, les mêmes expérimentateurs ont obtenu dans le tube (à — 23°) sous l'action d'une compression lente, un liquide séparé du gaz par un ménisque visible. La couleur du liquide étant franchement bleue, ils en ont conclu que sa coloration était due à l'ozone liquéfié. Les expériences de MM. Hautefeuille et Chapuis datent de l'année 1880.

Tel est, en résumé, l'ensemble des remarquables expériences qui ont achevé la démonstration de la possibilité de liquéfier tous les gaz jusque-là réputés permanents. A la vérité, ni M. Cailletet, ni M. Raoul Pictet n'ont réussi à obtenir l'oxygène, l'azote, l'hydrogène à l'état liquide en quantité suffisante et pendant un temps assez long pour que leurs propriétés, sous cette forme nouvelle, puissent être étudiées comme on a pu faire des propriétés de l'acide carbonique liquide par exemple. L'un et l'autre les ont obtenus à l'état

dynamique pour ainsi dire; il restait à les obtenir et à les conserver à l'état statique, comme on sait le faire, par exemple, depuis Faraday et Thilorier, pour l'acide carbonique. Cette seconde partie d'un problème qui a si longtemps déjoué les efforts et les tentatives des physiciens, n'est probablement pas, dans l'état actuel de la science, plus difficile à résoudre que la première; on peut même espérer le contraire.

En effet, au moment où nous écrivons (mai 1883), il semble que la science est sur le point de faire, si elle ne l'a fait déjà, cette nouvelle conquête. On va en juger par les notes que vient de recevoir l'Académie, dans ses séances du 16 et du 23 avril de cette même année. La première est relative à la liquéfaction de l'oxygène, et à la solidification de l'alcool et du sulfure de carbone; la seconde à la liquéfaction de l'azote. Les expériences ont été faites à Cracovie, au laboratoire de M. Wroblewski, et avec la collaboration de M. Olszewski. Il n'est que juste d'ajouter que le premier de ces savants avait assisté aux expériences de M. Cailletet à Paris et qu'il s'y était familiarisé avec le maniement de ses appareils. Voici la teneur de la première note :

« Les beaux travaux de MM. Cailletet et Raoul Pictet sur la liquéfaction des gaz ont permis d'espérer qu'un jour on arriverait à pouvoir observer l'oxygène réduit à l'état liquide dans un tube de verre, ainsi que cela se fait à présent pour l'acide carbonique. La condition était seulement d'obtenir une température suffisamment basse. M. Cailletet, dans une note publiée il y a un an, a recommandé l'éthylène liquéfié comme un moyen pour obtenir un froid très intense. Ce liquide, *sous la pression d'une atmosphère*, bout à —105° C., si l'on mesure la température avec un thermomètre à sulfure de carbone. Ayant comprimé l'oxygène dans un tube peu capillaire et refroidi dans ce liquide à —105° C., M. Cailletet a observé au moment de la détente « une ébullition tumultueuse qui persiste pendant un temps appréciable et ressemble à la projection d'un liquide dans la partie du tube refroidie. Cette ébullition

se forme à une certaine distance du fond du tube. Je n'ai pu reconnaître, ajoute M. Cailletet, si ce liquide préexiste ou s'il se forme au moment de la détente, car je n'ai pu voir encore le plan de séparation du gaz et du liquide. »

« Ayant profité d'un appareil nouveau construit par l'un de nous et qui permet de mettre des quantités de gaz relativement considérables sous des pressions de quelques centaines d'atmosphères, nous nous sommes proposé d'étudier les températures que présentent les gaz pendant la détente. Ces expériences nous ont menés bientôt à la découverte d'une température à laquelle le sulfure de carbone et l'alcool se laissent geler, et à laquelle l'oxygène se liquéfie complètement avec une très grande facilité. *On obtient cette température en faisant bouillir l'éthylène dans le vide.* La température dépendant du degré du vide obtenu, le minimum que nous avons pu obtenir jusqu'à présent est —136° C. Nous avons déterminé cette température, comme toutes les autres, avec un thermomètre à hydrogène. La température critique de l'oxygène est plus basse que celle à laquelle bout l'éthylène sous la pression atmosphérique. Cette dernière n'est pas —105° C., comme on l'a admis jusqu'à présent, mais elle se trouve entre —102° C. et —103° C., comme nous l'avons trouvé avec nos thermomètres.

« D'une série d'expériences que nous avons exécutées le 9 avril, nous donnons comme exemples les nombres suivants :

Températures.	Pression en atmosphères sous laquelle l'oxygène a commencé à se liquéfier.
— 131°,6	26,5
— 133°,4	24,8
— 135°,8	22,5

« En publiant ces nombres, nous réservons pour une note prochaine la communication de nombres définitifs.

« L'oxygène liquide est incolore et transparent comme l'acide carbonique. Il est très mobile et forme un ménisque très net. Quant au sulfure de carbone, il gèle vers —116° C. et

fond vers — 110° C. L'alcool devient visqueux comme l'huile vers — 120° C. et, se solidifiant vers — 130°,5 C., il devient un corps blanc. »

La seconde note de MM. Wroblewski et Olszewski a pour objet la liquéfaction de l'azote; elle est ainsi conçue :

« Ayant liquéfié l'oxygène d'une manière complète, nous avons essayé de liquéfier l'azote. Ce gaz, refroidi dans un tube de verre jusqu'à — 136° C. et soumis à la pression de 150 atmosphères, ne se liquéfie pas encore. Rien ne se laisse voir dans le tube. Si l'on fait une *détente brusque*, il y a dans tout le tube une ébullition tumultueuse. Elle peut être comparée seulement avec l'ébullition de l'acide carbonique liquide dans un tube de Natterer en verre, lorsqu'on plonge ce tube dans de l'eau chauffée à une température un peu supérieure à la température critique de l'acide carbonique. Mais, si l'on fait la détente lentement et si, en diminuant la pression, on ne dépasse pas la pression de 50 atmosphères, l'azote se liquéfie d'une manière complète : le liquide présente alors un ménisque bien distinct et s'évapore très vite.

« Ainsi l'azote ne reste que quelques secondes dans l'état statique des liquides stables. Pour pouvoir le maintenir plus longtemps dans cet état, on devrait disposer d'une température inférieure au minimum que nous avons été en état d'obtenir jusqu'à présent par notre procédé. Nous nous sommes occupés de rechercher les moyens d'obtenir cette température.

« L'azote liquide est incolore et transparent comme l'oxygène et comme l'acide carbonique[1]. »

Les mêmes savants ont annoncé en outre la liquéfaction de l'oxyde de carbone, liquéfaction effectuée dans les mêmes conditions que celle de l'azote, et donnant un liquide incolore avec un ménisque visible.

1. *Comptes rendus pour l'Académie des sciences pour* 1883, t. I.

CHAPITRE X

CALORIMÉTRIE
CHALEURS SPÉCIFIQUES DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ

§ 1. INÉGALE CAPACITÉ DES CORPS POUR LA CHALEUR.

Dans les deux ordres de phénomènes que nous avons étudiés jusqu'ici, et qui sont produits par les variations de la chaleur dans les corps, changements de volume ou changements d'état, le thermomètre est l'instrument qui a servi à préciser les conditions de ces changements. Qu'il s'agisse du thermomètre à mercure ou du thermomètre à air, les indications que donne son échelle mesurent les variations de son propre volume à partir d'un point arbitraire, et suffisent parfaitement à définir la température, ou l'état d'équilibre qui se produit ou tend à se produire, quand on met l'instrument dans un milieu plus chaud ou plus froid, c'est-à-dire possédant une température plus élevée ou plus basse que celle du thermomètre lui-même. Mais on comprend bien, et nous avons déjà insisté sur ce point, que les degrés du thermomètre ne donnent pas la mesure des quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans les phénomènes de variations de volume ou de changements d'état. Ils ne la donneraient pas davantage si ces degrés, au lieu d'être comptés à partir d'un point fixé arbitrairement, avaient pour point de départ le zéro absolu.

Nous allons voir en effet que la quantité de chaleur absorbée

ou dégagée pour produire l'augmentation ou la diminution de volume d'un corps, d'un certain poids d'une substance donnée par exemple, ne dépend pas seulement de la variation correspondante de température de ce corps, mais aussi de son poids, de la nature de sa substance, et quelquefois de sa température initiale. Il en est de même de la quantité de chaleur qui est absorbée ou dégagée dans les phénomènes de fusion ou de vaporisation, et dans les phénomènes inverses, de solidification ou de liquéfaction.

On doit regarder comme évident que la quantité de chaleur nécessaire à la production d'un phénomène est proportionnelle au poids du corps qui en est le siège; que si, pour s'échauffer par exemple de 10° à 15°, 1 kilogramme d'eau exige une quantité donnée de chaleur, 2, 3,..., 10 kilogrammes d'eau demanderont 2, 3,..., 10 fois plus de chaleur, pour être également portés de la température de 10° à celle de 15°. De même, si le corps revient à sa température primitive, il dégagera précisément toute la chaleur qu'il avait absorbée. On doit donc pareillement considérer comme évident que la quantité de chaleur absorbée ou dégagée par un corps d'un poids donné, lorsque sa température s'élève ou s'abaisse d'un certain nombre de degrés au-dessus ou au-dessous d'un point déterminé, est égale à celle qu'il dégage ou qu'il absorbe lorsqu'il est ramené à cette température primitive. L'expérience confirme d'ailleurs l'exactitude de ces principes.

Mais le second de ces principes est-il encore vrai, si l'on compare les quantités de chaleur absorbées ou dégagées à partir de températures différentes? Interrogeons pour cela l'expérience. Dans un vase qu'on a chauffé à la température de 25°, on verse 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme d'eau à 50°, puis, après avoir remué rapidement le mélange, on y plonge un thermomètre. On trouve que la température du mélange est de 25°. Ainsi la chaleur cédée par le kilogramme d'eau à 50° au kilogramme à 0° a suffi pour élever de 25° la température du second; en même temps cette perte

de chaleur subie par le premier a abaissé de 50° à 25° sa température. En définitive, cette expérience prouve que la chaleur nécessaire pour élever de 0° à 25° un poids d'eau déterminé élèverait de 25° à 50° le même poids d'eau. La température initiale n'a donc pas d'influence sur la quantité de chaleur absorbée. Cela est vrai pour l'eau et aussi pour quelques autres corps, mais seulement dans certaines limites de température, qui varient avec les différents corps, comme nous aurons l'occasion de le voir plus loin. Ainsi deux poids égaux de mercure, l'un à 200°, l'autre à 0°, mélangés ensemble, donnent deux kilogrammes de mercure, non plus à 100°, température moyenne entre les deux extrêmes, mais bien à 102°,85, température supérieure à cette moyenne. Au delà de 100°, le mercure absorbe ou dégage plus de chaleur, pour une même variation de température, qu'au-dessous de 100°.

Enfin, une troisième expérience montre que les quantités de chaleur que nous venons de comparer varient avec la nature des substances. Mélangeons séparément 1 kilogramme d'eau à 0° avec un même poids de mercure ou d'essence de térébenthine à 100°, ou encore plongeons-y 1 kilogramme de cuivre à 100°. Il y aura, comme précédemment, gain de chaleur pour l'eau, perte pour les autres substances, et dans chaque expérience il est bien évident que le gain sera égal à la perte. Mais dans le premier cas la température du mélange sera 3°,2; dans le second, 30°; dans le troisième cas, enfin, 8°,6. On voit donc de combien il s'en faut que des quantités de chaleur égales produisent la même variation de température sur des poids égaux de substances différentes. C'est ce qu'on exprime en disant que chaque substance a une *capacité calorifique*, ou une *chaleur spécifique*, qui lui est propre.

On doit à Tyndall une expérience assez curieuse propre à mettre en évidence la différence qui existe entre les divers corps au point de vue de leur capacité pour la chaleur. « Voici d'une part, dit-il, un gâteau de cire d'abeilles de 15 centimètres de diamètre et de 12 millimètres d'épaisseur,

de l'autre un vase contenant de l'huile, actuellement à la température de 180°. J'ai plongé dans l'huile chaude des balles de différents métaux, de fer, de plomb, de bismuth, d'étain, de cuivre. Elles ont toutes à présent la même température, à savoir : celle de l'huile. Très bien ! Je les tire de l'huile, et je les pose sur ce gâteau de cire CD (fig. 121) qui est porté par la rondelle d'un support de cornue ; elles font fondre la cire et s'y enfoncent; mais je vois qu'elles s'enfoncent avec des vitesses différentes. Le fer et le cuivre s'implantent dans la masse fusible bien plus vigoureusement que les autres métaux ; l'étain vient ensuite, mais le plomb et le bismuth restent tout à fait en arrière. Voici que le fer a traversé la cire de part en part et tombe ; le cuivre le suit ; je puis voir le fond de la boule d'étain poindre tout juste à la surface inférieure du gâteau, mais il ne peut aller plus loin, tandis que le plomb et le bismuth n'ont fait que bien peu de chemin, incapables qu'ils sont de dépasser la demi-épaisseur du gâteau[1]. »

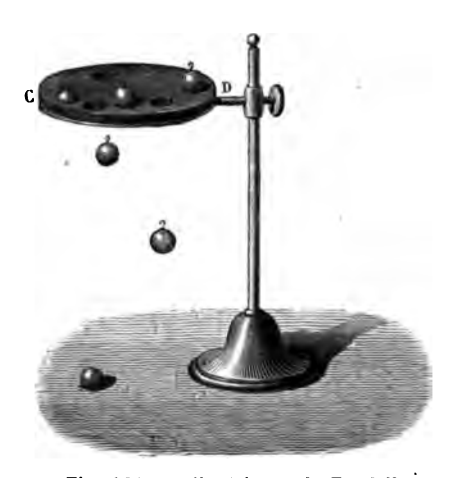


Fig. 121. — Expérience de Tyndall.

Les expériences rapportées plus haut datent du milieu du dix-huitième siècle ; c'est au physicien écossais Black que revient l'honneur de les avoir faites pour la première fois. Après lui vinrent Wilcke, Crawfort, puis Lavoisier et Laplace, et la branche si importante de la science de la chaleur qu'on nomme Calorimétrie fut fondée.

On dut, dès l'origine, faire choix d'une unité pour la mesure des quantités de chaleur. Voici la définition et le nom universellement adoptés pour cette unité.

1. *La Chaleur mode de mouvement.*

On nomme *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à +1° centigrade un poids d'eau distillée de 1 kilogramme. Comme nous venons de voir que pour l'eau, entre 0° et 100°, cette quantité reste constante quelle que soit la température initiale, on peut dire d'une façon plus générale qu'une calorie est la quantité de chaleur absorbée ou dégagée par 1 kilogramme d'eau distillée dont la température s'élève ou s'abaisse de 1 degré centigrade.

Si l'on prend la chaleur spécifique de l'eau pour unité, il est clair que la *chaleur spécifique* d'un corps quelconque devra se définir *le nombre de calories absorbées ou dégagées* par 1 kilogramme de ce corps, quand sa température s'élève ou s'abaisse de 1 degré. De même, on entendra par *chaleur latente de fusion, de vaporisation*, etc., le nombre de calories qu'un kilogramme de chaque substance demandera pour passer de l'état solide à l'état liquide, de celui-ci à l'état de vapeur, etc. Nous complèterons et préciserons bientôt la valeur de ces expressions; mais ce qui précède suffit à faire voir que la calorimétrie doit se diviser en deux parties correspondant aux procédés de mesure qui ont pour objet les deux questions suivantes :

1° Mesurer les *chaleurs spécifiques* des solides, des liquides et des gaz, c'est-à-dire les quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans les variations de température des diverses substances à ces divers états;

2° Mesurer les *chaleurs latentes*, ou évaluer les quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les divers changements d'état des mêmes substances.

Commençons par les chaleurs spécifiques.

§ 2. CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES. — MÉTHODES DES MÉLANGES, DU CALORIMÈTRE DE GLACE, DU REFROIDISSEMENT.

Les expériences de Black rapportées plus haut lui ont fourni le principe d'une première méthode pour la mesure des chaleurs spécifiques, de celle qu'on nomme la *méthode des mé-*

langes. Elle consiste à prendre un poids donné du corps dont on cherche la chaleur spécifique, et dont la température au moment de l'expérience est connue, à le plonger dans une masse d'eau de poids et de température également connus. Au bout d'un certain temps, l'eau et le corps arrivent à prendre une température commune, l'un perdant une certaine quantité de chaleur qui est évidemment égale à la chaleur absorbée par l'autre. L'équation à écrire pour résoudre le problème serait ainsi des plus simples. Dans le premier membre, on aurait le poids P du corps, multiplié par l'inconnue, c'est-à-dire par le nombre de calories qu'un kilogramme exige pour une variation de température de 1°, et par le nombre de degrés dont la température primitive T s'est abaissée pour arriver à la température commune θ. Ce premier membre est donc $Px(T-\theta)$. Dans le second, si p est le poids de l'eau, t sa température initiale, on aura $p(\theta-t)$, puisque à chaque degré d'élévation de température correspond 1 calorie, ou, ce qui revient au même, puisque la chaleur spécifique de l'eau est prise pour unité. On aurait ainsi :

$$Px(T-\theta)=p(\theta-t); \qquad \text{d'où} \qquad x=\frac{p(\theta-t)}{P(T-\theta)}.$$

Mais, en réalité, la solution n'est pas tout à fait aussi simple, parce que l'expérience ne peut se faire sans qu'il y ait des causes d'erreur provenant de diverses circonstances accessoires. Toutes ces circonstances sont relatives aux échanges de chaleur qui se font nécessairement entre les deux corps en expérience et le milieu ambiant. Énumérons ces diverses causes d'erreur.

Le vase qui contient l'eau et qu'on nomme le *calorimètre*, le thermomètre qui sert à mesurer la température du mélange, l'agitateur dont on se sert pour uniformiser cette température, s'échauffent aux dépens du mélange : il en est de même des supports du vase ; d'un autre côté, le corps est ordinairement placé dans une enveloppe solide qu'on plonge avec lui dans le

calorimètre et qui participe dès lors, par son propre refroidissement, à l'échauffement de l'eau du calorimètre. Enfin il y a encore des pertes de chaleur occasionnées par la conductibilité et le rayonnement. Sans entrer dans tous les détails d'une expérience, nous allons dire comment on procède pour éviter le plus possible ces causes d'erreur.

Le vase du calorimètre est un cylindre de laiton ou d'argent parfaitement poli, très mince, et on le fait soutenir par des fils de soie attachés à des supports, pour éviter les pertes de chaleur par conductibilité. Le corps, chauffé dans une étuve, est



Fig. 122. Calorimètre à eau.

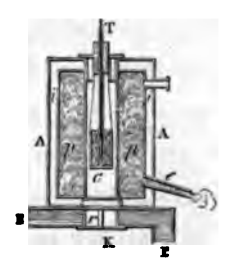


Fig. 123. — Étuve de l'appareil Regnault (coupe).

rapidement transporté, suspendu à un fil très fin, dans l'eau du calorimètre. On agite l'eau avec une baguette en verre *a*, et l'on observe le thermomètre, qui monte d'abord, puis finit par devenir stationnaire.

L'appareil de Regnault (fig. 124) montre comment le savant physicien procédait pour réduire au minimum les pertes de chaleur énumérées plus haut. D est le calorimètre à eau tel que nous venons de le décrire. Il est d'abord éloigné et isolé par un écran *h* de l'étuve où l'on chauffe le corps dont la chaleur spécifique est à déterminer. On voit dans la figure 123 comment cette étuve est disposée. C'est un vase cylindrique A formé par trois enveloppes concentriques; dans le compartiment central, on introduit une petite corbeille de fil de laiton *c* renfermant le corps solide divisé en petits fragments, ou, s'il s'agit d'un liquide, le tube en verre mince qui le contient; le

compartiment *p* qui enveloppe le premier reçoit, par un tube *e*, un courant de vapeur, qu'une chaudière B lui envoie, et qui va se condenser dans un serpentin en s'échappant par le tuyau *a*; enfin le compartiment extérieur *i*, plein d'air, a pour objet d'empêcher le rayonnement extérieur. Lorsque, au bout d'un certain temps, le thermomètre T, dont le réservoir plonge au milieu des fragments du corps, indique une température

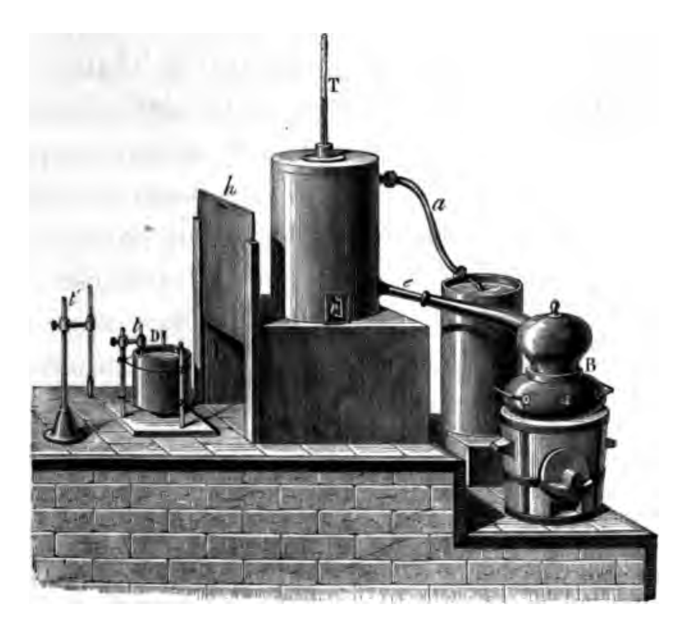


Fig. 124. — Appareil Regnault pour la méthode des mélanges.

stationnaire, on soulève l'écran *h*, on glisse sur les rails qui le portent le calorimètre D, on le fait avancer sous l'étuve par l'ouverture K, et il vient se placer au-dessous du compartiment central. On ouvre le registre *r* et l'on descend la corbeille ou le tube, à l'aide des fils qui les supportent, jusque dans l'eau du calorimètre. On retire ce dernier rapidement, et on agite l'eau jusqu'à ce que la température du mélange, marquée par le thermomètre, soit devenue stationnaire[1].

1. L'équation à écrire pour résoudre le problème avec les données de cette expérience est plus longue que celle que nous avons donnée plus haut; mais elle est tout aussi aisée à

La seconde méthode, imaginé par Wilcke[1] et rendue célèbre par les expériences de Laplace et Lavoisier qui l'ont notablement perfectionnée, est celle du *puits de glace* ou du *calorimètre de glace*. Elle est basée sur un fait d'expérience, qui n'est autre que la connaissance du nombre de calories nécessaire pour fondre un kilogramme de glace, ou de la chaleur latente de fusion de la glace. Comme nous le verrons bientôt, on a trouvé que la chaleur latente de fusion de la glace est de 79,25 calories, c'est-à-dire que la quantité de chaleur absorbée par un kilogramme de glace pour se fondre suffirait à élever à la température de 1 degré 79^{kil},25 d'eau à 0°, ou bien, ce qui revient au même, à élever de 0° à 79,25 un kilogramme d'eau. Ou encore, quand on fait fondre un kilogramme de glace à 0° dans un kilogramme d'eau à 79°,25, les deux kilogrammes d'eau qui résultent de la fusion sont tous deux à la température de 0°. La connaissance de ce résultat permettra donc de mesurer la chaleur spécifique d'un corps en cherchant par l'expérience le poids de glace que ce corps sera susceptible de fondre en abaissant sa propre température à 0°. Voici comment on procède :

Dans un bloc de glace, bien compact et bien homogène, on creuse une cavité, dont on essuie avec soin les parois. On y introduit alors le morceau de la substance dont il s'agit de trouver la chaleur spécifique, et dont la température, supérieure à 0°, est connue; puis on pose sur la face bien plane

comprendre et d'une solution tout aussi simple, quoique renfermant des calculs plus nombreux. La voici :

$$(Px + P'c)(T - \theta) = (p + p'c + p''c' + p'''c'')(\theta - t) + R + C.$$

P', p', p'' et p''' représentent les poids de la corbeille, du calorimètre, tous deux en laiton, du mercure du thermomètre et du verre de ce dernier, ainsi que de l'agitateur ; c, c', c'' sont les chaleurs spécifiques des mêmes corps; R et C sont enfin les pertes dues au rayonnement et à la conductibilité, évaluées en calories. Dans l'appareil Regnault, on peut regarder C comme négligeable, parce que la perte par les supports en fils de soie est à peu près nulle.

Le terme $p + p'c + p''c' + p'''c''$ du second membre se nomme la *valeur du calorimètre réduite en eau*, parce qu'il exprime le nombre de kilogrammes d'eau que la chaleur cédée élèverait à la température 0, si elle était tout entière employée à cet office.

1. Wilcke employait, non la fusion de la glace, mais celle de la neige. La difficulté de recueillir l'eau provenant de la fonte de la neige lui fit abandonner cette méthode et préférer celle des mélanges. Ses expériences ont été publiées en 1781.

du bloc une plaque épaisse de glace qui lui sert de couvercle (fig. 125). En se refroidissant, le corps fond une portion de la glace avec laquelle il se trouve en contact ; on recueille l'eau de fusion, et on la pèse. Supposons qu'on trouve pour résultat 100 grammes ou la dixième partie de 1 kilogramme : il est clair que la chaleur totale dégagée par le corps, pour s'abaisser à 0°, a été la dixième partie de 79,25 calories, ou 7,925 calories. Par hypothèse, le corps pesait 2 kilogrammes, et était d'abord à la température de 34°,75. En divisant 7,925 par 34,75, puis par 2, on trouvera la quantité de chaleur dégagée par 1 kilo-

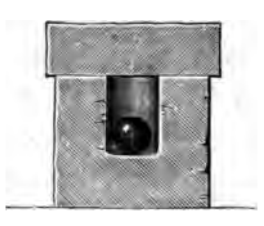


Fig. 125. — Mesure de la chaleur spécifique des corps. Méthode du puits de glace.



Fig. 126. — Calorimètre de glace de Laplace et Lavoisier.

gramme pour une variation de 1°, c'est-à-dire la chaleur spécifique du corps. Dans le cas particulier que nous venons de choisir, on trouverait 0,114 : c'est la chaleur spécifique du fer.

Outre la difficulté de se procurer des blocs de glace assez

épais, le procédé du puits de glace offre une cause d'erreur difficile à apprécier : on ne sait si la température intérieure de la glace n'est pas inférieure à zéro. Aussi emploie-t-on de préférence le *calorimètre de glace* imaginé en 1780 par Laplace et Lavoisier, et que la figure 126 représente en coupe et en élévation. C'est un appareil formé de trois vases qui s'enveloppent mutuellement, et entre lesquels on place des fragments de glace et de la glace pilée. Le corps chaud se place à l'intérieur du plus petit vase, qui est formé d'un treillis de fil de fer, ou d'une mince enveloppe percée de trous ; en se refroidissant, il fond une certaine quantité de glace, et l'on recueille l'eau de fusion par un robinet situé au-dessous du vase. La glace située entre les deux vases extérieurs empêche la fusion, par la chaleur extérieure, de celle qui est en contact avec le corps chaud.

La méthode du calorimètre de glace ne comporte pas une précision aussi grande que celle des mélanges, à moins qu'on n'opère sur des masses un peu considérables. L'air extérieur, si la température atteint seulement 9 ou 10 degrés, pénètre par le robinet du fond et remplace l'air plus froid que sa densité fait écouler par ce robinet. Il contribue à fondre une certaine quantité de glace. Lavoisier et Laplace, pour obvier à cet inconvénient, s'astreignaient à n'opérer que si la température extérieure était descendue à 3 ou 4 degrés, ou mieux encore à 1 ou 2 degrés[1]. Alors ils répondaient de l'exactitude de leurs expériences à un quarantième ou à un soixantième près. Il y a une autre cause d'incertitude, qui vient de ce qu'à la fin de l'expérience les fragments de glace restent imbibés à la surface d'une quantité d'eau qui n'est plus la même qu'au com-

1. Il importe toutefois d'opérer quand la température de l'atmosphère est au-dessus de zéro ; car, ainsi que le font observer les deux savants expérimentateurs, « si la température extérieure était au-dessous de zéro, l'atmosphère pourrait refroidir la glace intérieure. Ainsi, dans un temps de gelée, il faudra renfermer la machine dans un appartement dont on aura soin d'échauffer l'intérieur. Il est encore nécessaire que la glace dont on fait usage ne soit pas au-dessous de zéro ; si elle était dans ce cas, il faudrait la piler, l'étendre par couches fort minces, et la tenir ainsi, pendant quelque temps, dans un lieu dont la température soit au-dessus de zéro. » (Œuvres complètes de Lavoisier, *Mémoire sur la chaleur*, t. II.)

mencement, puisque le volume et par suite la surface des fragments a changé par le fait de la fusion.

Il y a une troisième méthode pour mesurer les chaleurs spécifiques : c'est celle dite du *refroidissement*, parce qu'elle est basée sur le temps plus ou moins long que mettent les corps pour se refroidir d'un même nombre de degrés, lorsqu'on les place dans une enceinte vide, dont la température est elle-même constante. Le corps, placé dans un petit vase d'argent poli extérieurement, est introduit au centre d'un récipient métallique dont les parois internes ont été enduites de noir de fumée bien desséché. On fait le vide dans le récipient, puis on note le temps qui s'écoule entre les instants où le thermomètre du vase s'abaisse d'un nombre de degrés déterminé au-dessous de la température initiale. On répète la même expérience en remplaçant le corps par de l'eau distillée. On en conclut le rapport des quantités de chaleur cédées dans les deux cas, lequel est celui des chaleurs spécifiques.

C'est à Tobie Mayer qu'est due cette méthode, qui, perfectionnée en premier lieu par Dulong et Petit, et employée par Regnault, a été reconnue par ce dernier défectueuse pour les solides et applicable seulement aux corps liquides.

§ 3. LOIS DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS SIMPLES ET DES CORPS COMPOSÉS.

Voici un tableau donnant les chaleurs spécifiques d'un certain nombre de corps, simples ou composés, à l'état solide ou à l'état liquide ; rappelons que la chaleur spécifique de l'eau est prise pour unité, et que les valeurs du tableau, rangées par ordre de grandeurs décroissantes, expriment généralement pour les solides la chaleur spécifique moyenne entre les températures extrêmes de 0° et de + 100° ; pour les liquides, la chaleur spécifique est relative à la température moyenne de + 15°.

CORPS SOLIDES.

Noms des substances.	Chaleurs spécifiques.	Noms des substances.	Chaleurs spécifiques.
1° *Métaux et métalloïdes.*		2° *Oxydes, sels anhydres.*	
Sodium	0,293	Carbonate de soude	0,273
Magnésium	0,250	Magnésie	0,244
Aluminium	0,218	Borate de soude	0,238
Soufre ordinaire	0,203	Sulfate de soude	0,231
— mou, trempé	0,184	Phosphate de soude	0,228
Phosphore ordinaire	0,179	Sulfate de magnésie	0,221
— rouge	0,170	Carbonate de potasse	0,216
Potassium	0,170	— de chaux (craie)	0,215
Fonte de fer	0,130	Chlorure de sodium	0,214
Manganèse	0,120	Carbonate de chaux (marbre)	0,210
Acier	0,117	— de chaux (spath)	0,208
Fer	0,114	— de chaux (arragonite)	0,208
Nickel	0,108	Alumine	0,198
Cobalt	0,107	Sulfate de chaux	0,196
Zinc	0,096	Chlorure de calcium	0,164
Cuivre	0,095	Nitrate d'argent	0,143
Laiton	0,094	Chlorure de cuivre	0,138
Arsenic	0,081	Sulfure de zinc	0,123
Palladium	0,059	Bromure de potassium	0,113
Argent	0,057	Iodure de potassium	0,082
Cadmium	0,057	Sulfure d'argent	0,074
Étain	0,056	3° *Matières diverses.*	
Iode	0,054	Bois de pin	0,650
Antimoine	0,051	— de chêne	0,570
Or	0,032	Glace (eau solide)	0,504
Platine	0,032	Charbon de bois	0,241
Plomb	0,031	Coke	0,201
Bismuth	0,031	Verre (crown glass)	0,198
Mercure solide	0,031	Cristal (flint glass)	0,190

LIQUIDES.

Alcool à 85°	0,659	Acide sulfurique (à 1,80)	0,335
Acide chlorhydrique	0,600	Huile d'olive	0,310
Alcool absolu	0,579	Sulfure de carbone	0,238
Éther absolu	0,533	Chloroforme	0,225
Essence de térébenthine	0,421	Brome	0,111
Benzine	0,399	Mercure	0,033

La lecture de ce tableau et la comparaison des nombres qu'il renferme montrent qu'il y a certaines relations générales entre la chaleur spécifique, la densité, l'état et la structure physique

des corps. Par exemple, ce sont les métaux les plus denses qui sont doués de la plus faible capacité pour la chaleur. Ce rapport est très sensible pour l'or, le platine, le plomb, le bismuth, le mercure, qu'on voit aux derniers rangs du tableau, tandis que le potassium, l'aluminium, le magnésium sont en tête.

L'état physique a aussi une certaine influence : le mercure liquide a une plus forte chaleur spécifique que le mercure solide, comme aussi il a une moindre densité. La même remarque peut s'étendre à d'autres corps : la glace a une chaleur spécifique moitié moindre que celle de l'eau, mais dans ce cas la densité est moindre aussi. La chaleur du brome liquide est 0,111, celle du brome solide tombe à 0,084.

Les solides qui, comme le phosphore, le soufre, le carbonate de chaux, peuvent prendre plusieurs modes d'agrégation moléculaire, ont des chaleurs spécifiques variables avec leur structure. Le carbone est un des corps qui présentent à cet égard les différences les plus sensibles. Nous voyons que le charbon de bois a pour chaleur spécifique 0,241, le coke 0,201 ; à l'état de graphite, on a trouvé des nombres variant entre 0,197 et 203 ; le diamant n'a plus que 0,146 à 0,148, et au contraire celle du noir animal s'élève à 0,260.

Pour une même substance, la chaleur spécifique moyenne s'élève généralement avec la température. Voici quelques nombres obtenus par Dulong et Petit :

	De 0° à 100°.	De 0° à 300°.
Mercure.	0,033	0,035
Platine.	0,036	0,036
Antimoine.	0,051	0,055
Argent	0,056	0,061
Zinc	0,093	0,102
Cuivre	0,095	0,101
Fer.	0,110	0,122
Verre.	0,177	0,190

Voici d'autres résultats dus à Regnault :

	De −77°,7 à +10°.	De +10° à +30°.
Phosphore	0,174	0,189
Plomb	0,0307	0,0314 (à + 100°)

Nous avons supposé la chaleur spécifique de l'eau constante, et, à la vérité, elle ne s'accroît que très faiblement avec la température. Mais dans les recherches de précision on doit tenir compte de cet accroissement. D'autres liquides, l'alcool, l'essence de térébenthine, le sulfure de carbone, l'éther, le chloroforme, ont une variation beaucoup plus accusée. Par exemple, les recherches de Regnault ont montré que la chaleur spécifique de l'alcool, qui est égale à 0,522 entre —23° et 0°, s'élève à 0,621 de 0° à 66°; celle de l'éther, entre —20° et +30°, passe de 0,523 à 0,538; celle du chloroforme, égale à 0,230 en moyenne entre —30° et 0°, monte à 0,235 entre 0° et 60°.

Mais arrivons à la loi la plus importante qui ait été formulée sur les chaleurs spécifiques. Dulong et Petit l'ont découverte en 1818, en comparant les valeurs qu'ils avaient obtenues, par la méthode du refroidissement, pour les chaleurs spécifiques de treize corps simples avec les poids atomiques des mêmes éléments ; et ils étaient arrivés à cette conclusion que *les atomes de tous les corps simples ont la même capacité pour la chaleur*. Entrons dans quelques développements à ce sujet.

On sait que les corps simples se combinent entre eux en proportions définies, et que, si deux corps simples ou composés s'unissent entre eux pour former deux ou plusieurs combinaisons, en considérant comme constant le poids de l'un des deux, les poids de l'autre corps varient d'une combinaison à l'autre suivant des rapports simples : c'est la loi des proportions multiples découverte par Dalton. Elle a conduit les chimistes à l'hypothèse des atomes, parties indivisibles de la matière des corps pondérables. Pour un même corps simple, le poids de l'atome serait invariable, mais ce poids varierait d'un corps à l'autre. En prenant pour unité le poids de l'un d'eux, de l'atome d'hydrogène par exemple, ceux des autres corps simples sont ce qu'on nomme en chimie leurs *équivalents* ou encore leurs *poids atomiques*.

D'autre part, Gay-Lussac découvrait, à peu près à la même époque où Dalton formulait la loi des proportions multiples,

que les volumes des gaz qui se combinent entre eux sont toujours dans des rapports simples, et qu'il en est de même du volume du gaz ou de la vapeur résultant de leur combinaison. C'est ainsi que 2 volumes d'hydrogène combinés avec 1 volume d'oxygène donnent exactement 2 volumes de vapeur d'eau. On admet d'ailleurs comme une conséquence naturelle de l'identité des lois de dilatation des substances gazeuses, que les atomes des divers gaz sont, sous la même pression et à une même température, à égale distance les uns des autres, de sorte que deux volumes égaux de gaz différents renferment toujours le même nombre d'atomes. S'il en est ainsi, les densités des gaz, c'est-à-dire les poids de ces gaz à volume égal, sont évidemment proportionnelles à leurs poids atomiques.

Les lois de Dalton et de Gay-Lussac ont permis aux chimistes de fixer les poids atomiques des corps simples, ainsi que les poids des molécules des corps composés.

Ces notions rappelées, voyons comment Dulong et Petit ont pu vérifier la loi énoncée plus haut, à savoir que la chaleur spécifique d'un atome est la même pour tous les corps simples. Les valeurs trouvées par ces savants pour les chaleurs spécifiques des treize corps qu'ils avaient étudiés, représentaient d'après la définition les quantités de chaleur absorbées par l'unité de poids, le kilogramme. Pour avoir la quantité absorbée par un atome, il fallait diviser les chaleurs spécifiques trouvées par les nombres relatifs des atomes, ou, ce qui revient au même, les multiplier par les poids atomiques correspondants, puisque ces nombres sont évidemment en raison inverse du poids de chaque atome. Pour que la loi de Dulong et Petit soit vraie, il faut donc que le produit de la chaleur spécifique d'un corps simple par son poids atomique soit le même pour tous, soit un nombre constant. Or c'est ce qui se trouvait exact pour les treize corps dont Dulong et Petit avaient mesuré les chaleurs spécifiques. Voici en effet les résultats auxquels les conduisaient leurs expériences et leurs calculs :

Corps simples.	Chaleurs spécifiques.	Poids des atomes.	Produits.
Bismuth.	0,0288	13,30	0,383
Plomb	0,0293	12,95	0,379
Or	0,0298	12,43	0,370
Platine	0,0314	11,16	0,374
Étain	0,0514	7,35	0,378
Argent	0,0557	6,75	0,376
Tellure	0,0912	4,03	0,368
Zinc.	0,0927	4,08	0,374
Cuivre.	0,0941	3,96	0,376
Nickel.	0,1035	3,69	0,382
Fer.	0,1100	3,39	0,373
Cobalt.	0,1498	2,46	0,388
Soufre.	0,1880	2,01	0,378

Comme on le voit, les différences entre les produits étaient assez faibles pour qu'on pût les attribuer soit aux erreurs d'observation, soit à l'incertitude des nombres fournis par les analyses chimiques pour les poids des atomes.

La loi de Dulong et Petit avait une trop haute importance pour n'être pas soumise à des vérifications plus étendues. C'est un des principaux motifs qui déterminèrent Regnault à entreprendre ses belles recherches sur les chaleurs spécifiques. Les résultats qu'il obtint ne furent pas aussi favorables que ceux qu'avaient trouvés les savants qui avaient formulé la relation entre les poids des atomes et la chaleur spécifique. Les produits variaient entre 0,38 et 0,42 et la différence ne pouvait plus être attribuée aux incertitudes et erreurs des expériences. Cependant Regnault n'en conclut pas que la loi de l'égalité de la chaleur spécifique soit fausse, et il en donne les raisons en ces termes :

« Cette loi représenterait probablement, dit-il, les résultats de l'expérience d'une manière tout à fait rigoureuse, si l'on pouvait prendre la chaleur spécifique de chaque corps à un point déterminé de son échelle thermométrique, et si l'on pouvait débarrasser sa chaleur spécifique de toutes les influences étrangères qui la modifient dans l'observation. Ces influences peuvent être de différentes natures. Les corps qui passent par

l'état de mollesse, avant de se fondre complètement, renferment probablement déjà, avant leur liquéfaction, une portion de leur chaleur de fusion qui s'ajoute, dans l'expérience, à la chaleur spécifique. D'un autre côté, la capacité calorifique, telle que nous la déterminons par l'expérience, s'obtient d'après l'observation de la quantité de chaleur que le corps a dû absorber pour produire son élévation de température (et c'est là, à proprement parler, sa chaleur spécifique), plus de la quantité de chaleur qu'il a dû prendre pour produire sa dilatation. Cette dernière quantité de chaleur, que l'on pourrait appeler *chaleur latente de dilatation*, s'ajoute dans l'expérience à la chaleur spécifique ; elle est très grande dans les corps gazeux, beaucoup plus faible dans les corps solides et les liquides ; mais dans aucun cas elle n'est négligeable, et elle doit faire varier nécessairement d'une manière sensible la chaleur spécifique observée.

« Toutes ces causes d'erreur sont compliquées par le choix arbitraire de l'origine à partir de laquelle on compte, pour chaque corps, les élévations de température, choix qui n'est déterminé par aucune propriété physique telle que le point de fusion ou d'ébullition, mais se trouve le même pour des corps de nature complètement différente. L'augmentation de la chaleur spécifique avec la température suffirait seule pour démontrer la nécessité de choisir, pour chaque substance, un point de départ en rapport avec un de ses autres caractères spécifiques. »

Quoi qu'il en soit de ces difficultés, la loi de la chaleur spécifique des atomes pour les corps simples mérite d'autant plus l'attention qu'une loi analogue a été découverte entre les chaleurs spécifiques et les poids atomiques des corps composés. M. Newmann a trouvé que le produit de ces nombres est constant pour une même classe de corps ou pour ceux qui ont une constitution chimique semblable, mais qu'il est variable d'une classe à l'autre. Regnault a donné cette formule générale, qui comprend la loi de Dulong et Petit et celle de Newmann

comme cas particuliers : *Dans tous les corps composés de même composition atomique et de constitution chimique semblable. les chaleurs spécifiques sont en raison inverse du poids atomique.*

Les tableaux suivants permettront au lecteur de se faire une idée nette de l'état de la question, en ce qui concerne le plus ou moins de conformité des lois ci-dessus énoncées avec les résultats numériques déduits des recherches des physiciens et des chimistes sur ces questions difficiles. Nous ferons seulement remarquer qu'ici les poids atomiques sont ceux qu'on obtient en prenant pour unité le poids de l'atome d'hydrogène :

I. — CORPS SIMPLES (LOI DE DULONG ET PETIT).

Noms des substances.	Chaleurs spécifiques.	Poids atomiques.	Produits de la chaleur spécifique par le poids atomique[1].
Antimoine	0,051	122	6,22
Argent	0,057	108	6,16
Arsenic	0,081	75	6,07
Bismuth	0,031	210	6,51
Cadmium	0,057	112	6,38
Cobalt	0,107	59	6,30
Cuivre	0,095	63,4	6,02
Étain	0,056	118	6,60
Fer	0,114	56	6,38
Iode	0,054	127	6,85
Magnésium	0,250	24	6,00
Manganèse	0,120	27,5	3,30
Mercure	0,033	100	3,30
Nickel	0,108	59,2	6,40
Or	0,032	196,4	6,30
Palladium	0,059	53,2	3,14
Platine	0,032	197,5	6,32
Plomb	0,031	207	6,40
Potassium	0,170	39,1	6,60
Sodium	0,293	23	6,73
Soufre	0,203	32	6,50
Zinc	0,095	65	6,20

1. On peut remarquer que, pour trois des corps simples du tableau, le produit n'est que la moitié environ de la moyenne 6,36 des autres nombres; ce qui tient peut-être à la valeur deux fois trop faible de leurs poids atomiques. Certains auteurs doublent en effet cette valeur pour les corps en question, qui sont le manganèse, le mercure, le palladium. D'au-

II. — CORPS COMPOSÉS (LOI DE NEWMANN).

Noms des substances.	Chaleurs spécifiques.	Poids atomiques.	Produits de la chaleur spécifique par le poids atomique.
Oxyde de plomb, PbO.	0,051	111,5	5,68
— de mercure, HgO . . .	0,052	108	5,61
— de cuivre, CuO	0,142	39,7	5,63
Chlorure d'argent, Ag^2Cl. . .	0,091	143,5	13,05
— de cuivre, Cu^2Cl. . .	0,138	98,9	13,64
— de sodium, Na^2Cl. .	0,214	58,5	12,52
— de plomb, $PbCl$. . .	0,066	139	9,17
— de mercure, $HgCl$. .	0,069	135,5	9,34
— de zinc, $ZnCl$. . . .	0,136	68	9,24
Nitrate d'argent, $Ag^2O\,AzO^5$. .	0,143	170	24,31
— de potasse, $K^2O\,AzO^5$.	0,239	101,1	24,16
— de soude, $Na^2O\,AzO^5$.	0,278	85	23,63
Sulfate de chaux, $CaO\,SO^3$.. .	0,196	68	13,32
— de baryte, $BaO\,SO^3$. .	0,113	116,5	13,16
— de plomb, $PbO\,SO^3$. .	0,087	151,5	13,18
Carbonate de chaux, $CaO\,CO^2$.	0,210	50	10,50
— de baryte, $BaO\,CO^2$.	0,110	98,5	10,83
— de fer, $FeO\,CO^2$. . .	0,193	58	11,19

§ 4. CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ.

Les diverses méthodes exposées dans les paragraphes qui précèdent avaient pour objet la détermination de la chaleur spécifique des corps à l'état solide ou à l'état liquide. Il n'était pas moins important de mesurer celle des gaz. En 1784, Lavoisier et Laplace firent avec leur calorimètre quelques expériences ayant pour but de mesurer la *quantité de glace que fond une livre d'air vital et une livre d'air de l'atmosphère en se refroidissant, depuis 60 degrés du thermomètre jusqu'au terme de la congélation*. Le gaz dont ils voulaient mesurer la

tres font l'inverse et adoptent des nombres moitié moindres pour la plupart des corps simples ci-dessus.

Le carbone semble échapper tout à fait à la loi de Dulong. Nous avons dit quelles différences considérables on trouvait pour sa chaleur spécifique selon son état moléculaire. Cependant, si l'on multiplie 0,26, chaleur spécifique du noir animal, par 24, poids atomique du carbone doublé, on trouve 6,24, qui rentre dans la loi.

chaleur spécifique passait d'abord du gazomètre dans des serpentins plongés dans des vases pleins d'eau qu'on pouvait chauffer à volonté; puis de là dans un serpentin entouré de la glace du calorimètre, d'où il ressortait à zéro après avoir cédé la chaleur acquise à la glace, dont on recueillait et pesait la quantité fondue. Quelques années après, Crawford se servait dans le même but de la méthode des mélanges. Puis vinrent les travaux de Leslie, de Gay-Lussac, de Dalton, de Dulong, etc.; mais tous les résultats obtenus étaient entachés de causes d'erreur diverses, qu'accusait d'ailleurs leur désaccord.

Ce n'est qu'en 1813 que le mémoire de deux physiciens français, Delaroche et Bérard, mémoire couronné par l'Académie des sciences, résolut avec quelque précision le problème délicat de la détermination de la chaleur spécifique des gaz. Ce problème peut du reste être posé de deux manières différentes. Pour les solides et les liquides, nous avons vu que les chaleurs spécifiques mesurées se composent de deux parties, qui s'y trouvent confondues : la chaleur absorbée par l'élévation de température du corps et celle qui est employée à produire la dilatation correspondante. La pression est d'ailleurs supposée constante pendant toute la durée des expériences. Pour les gaz, on peut et on doit distinguer entre la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de poids d'un degré, et celle qui serait capable de produire le même effet lorsque le gaz peut se dilater librement. En effet, on sait par expérience que tout changement de volume d'un gaz donne lieu à une variation de température; quand on le comprime, de la chaleur est dégagée et la température s'élève, tandis que le contraire a lieu si le gaz se dilate.

De là deux chaleurs spécifiques d'un même gaz : la chaleur spécifique *sous pression constante*, et la chaleur spécifique *sous volume constant*. C'est la première que Delaroche et Bérard déterminèrent dans leur grand travail. Voici un aperçu de la méthode que ces savants avaient employée.

Le gaz contenu d'abord dans une vessie de grandes dimen-

sions s'en échappait avec une vitesse constante, et venait s'échauffer à l'intérieur d'un long tube de cuivre qu'entourait un manchon rempli de vapeur d'eau bouillante. En sortant du tube, il pénétrait dans un serpentin plongé dans un calorimètre plein d'eau froide, et lui cédait toute la chaleur qu'il avait acquise par son passage dans le tube que chauffait la vapeur. La constance de l'écoulement du gaz et, par suite, de la pression était obtenue à l'aide de deux vases de Mariotte, communiquant avec deux ballons renfermant chacun une vessie pleine de gaz; la circulation d'une même quantité de gaz pouvait ainsi être prolongée assez longtemps, pour que l'eau du calorimètre pût prendre une élévation de température de plusieurs degrés. On calculait ainsi la quantité de chaleur abandonnée par l'unité de volume ou par l'unité de poids du gaz, pour s'abaisser de la température de 100° à une température déterminée. Il y avait lieu, bien entendu, à diverses corrections relatives aux pertes de chaleur que le rayonnement et la conductibilité produisaient dans les diverses parties de l'appareil. Mais une cause d'erreur qu'on ne pouvait soupçonner à l'époque où furent faites ces remarquables expériences, c'est celle qui provenait de l'endosmose : on ignorait alors que l'air extérieur pouvait pénétrer à l'intérieur des vessies et se mêler avec le gaz intérieur qu'elles contenaient.

Néanmoins les résultats furent très voisins de ceux que Regnault trouva plus tard par des méthodes perfectionnées. Décrivons sommairement le procédé adopté par ce dernier pour déterminer la chaleur spécifique des gaz sous pression constante. Un récipient métallique de grande capacité était rempli à l'avance du gaz parfaitement purifié, sec et fortement comprimé, dont la température était maintenue constante par un courant extérieur d'eau froide. Un manomètre en mesurait la pression. De ce gazomètre, le gaz était conduit dans un bain d'huile par un tube muni d'un régulateur et qui se déroulait dans le bain en forme de serpentin. De là il arrivait au calorimètre. Ce dernier présentait une disposition particulière : il

contenait une série de boîtes métalliques superposées, où arrivait le gaz; mais, afin de fournir à celui-ci le plus long parcours possible, les boîtes étaient divisées intérieurement par des cloisons de forme spiraloïde, et c'est après en avoir suivi toutes les sinuosités que le gaz s'échappait enfin dans l'atmosphère. Le régulateur mentionné plus haut permettait de faire varier à volonté la vitesse d'écoulement du gaz. En le disposant convenablement, on pouvait aussi opérer à des pressions très différentes.

Bornons-nous à cette description fort abrégée et arrivons aux résultats obtenus. Comme conclusion générale de ses recherches, Regnault a reconnu : 1° que la chaleur spécifique des gaz est indépendante de la pression, sauf dans le voisinage de leur point de liquéfaction ; 2° qu'elle croît avec la température pour les gaz qui s'écartent sensiblement de la loi de Mariotte. Ainsi la chaleur spécifique de l'air est rigoureusement constante depuis — 30° jusqu'à + 225°; il en est de même de la chaleur spécifique de l'hydrogène, tandis que celles de l'acide carbonique et du protoxyde d'azote augmentent avec la température.

Voici les chaleurs spécifiques moyennes entre 0° et 200° de quelques gaz, rapportées à celle de l'eau prise pour unité, sous la pression constante d'une atmosphère :

Air.	0,2375	Chlore	0,1210
Oxygène.	0,2175	Vapeur de brome. . .	0,0555
Azote.	0,2438	Acide sulfureux. . . .	0,1544
Hydrogène	3,4090	— chlorhydrique. .	0,1845
Acide carbonique . . .	0,2169	— sulfhydrique . .	0,2432
Protoxyde d'azote . . .	0,2262	Gaz ammoniac	0,5084
Oxyde de carbone. . .	0,2370	Éther chlorhydrique. .	0,2737
Gaz oléfiant.	0,3930	Bioxyde d'azote. . . .	0,2317

Tous ces nombres représentent, d'après la définition, les quantités de chaleur qui élèveraient de 1 degré la température de l'unité de poids de chacun des gaz. Mais, sous la même pression, les poids égaux ont des volumes inversement proportionnels aux densités. Par conséquent, si l'on multiplie les chaleurs spécifiques ci-dessus par la densité de chaque gaz, le

produit exprimera la quantité de chaleur qu'il faudrait pour élever de 1 degré la température de l'unité de volume. Les produits ainsi obtenus seront les *chaleurs spécifiques des gaz rapportées à l'unité de volume*. D'autre part, il est admis que, sous l'unité de volume, les gaz contiennent le même nombre d'atomes. Les mêmes produits représenteront donc les chaleurs spécifiques atomiques des gaz, ou du moins des nombres proportionnels, et par conséquent devront être égaux entre eux, si la loi de Dulong et Petit est applicable aux gaz.

Voyons ce que dit à cet égard l'expérience.

Le tableau qui suit donne, pour cinq gaz, dont trois permanents, et pour l'air, les produits de leurs chaleurs spécifiques par leurs densités, c'est-à-dire les chaleurs spécifiques rapportées au volume; pour les cinq mêmes gaz, il donne les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques eux-mêmes, ou les chaleurs spécifiques atomiques :

	Chaleurs spécifiques		
Gaz.	à poids égal.	à volume égal.	atomiques.
	c	cd	cA
Oxygène	0,2175	0,2405	3,4800
Hydrogène	0,4090	0,2361	3,4090
Azote	0,2438	0,2368	3,4132
Chlore	0,1210	0,2979	4,2955
Brome	0,0555	0,3073	4,3456
Air	0,2375	0,2375	»

Les trois premiers nombres des deux dernières colonnes sont sensiblement égaux entre eux ; mais il n'en est pas de même des suivants. Les gaz qu'on appelait permanents, c'est-à-dire qui sont, dans les conditions ordinaires, éloignés de leur point de liquéfaction, suivent donc sensiblement la loi de Dulong et Petit; mais il est à remarquer que leur chaleur spécifique atomique n'est guère que la moitié de celle qu'on trouve pour les solides et les liquides. Quant aux gaz tels que le chlore et le brome, ils paraissent s'écarter notablement de la loi.

En résumé, les lois générales par lesquelles on a cherché jusqu'ici à exprimer les rapports existant entre les capacités

des corps pour la chaleur, sous leurs trois états, sont loin de présenter l'uniformité, la constance qui doit caractériser les lois physiques ou naturelles. Elles offrent cependant, telles qu'elles sont, avec leurs exceptions et leurs anomalies, un sérieux intérêt pour les chimistes et pour les physiciens. Il est à croire d'ailleurs que les progrès rapides dont la théorie mécanique de la chaleur a enrichi la science dans ces derniers temps, et qu'un grand nombre de savants éminents poursuivent aujourd'hui, feront disparaître les obscurités qui règnent encore sur ce point, et donneront la raison des anomalies signalées.

CHAPITRE XI

CALORIMÉTRIE — CHALEURS LATENTES DE FUSION ET DE VAPORISATION

§ 1. CHALEUR LATENTE DE FUSION.

Rappelons le phénomène qui caractérise la fusion des solides, lorsque cette fusion s'effectue brusquement, sans que le corps subisse un ramollissement préalable : la transition de l'état solide à l'état liquide se fait sans augmentation de température, tant que la masse du corps n'est pas entièrement fondue. Toute la chaleur fournie par le foyer ou par le milieu dans lequel le solide se trouve plongé, est absorbée par le travail de la fusion ; cette chaleur ne se manifestant point par une élévation thermométrique, c'est, ainsi que nous l'avons vu, ce qu'on nomme la *chaleur latente de fusion*.

Quand, par un phénomène inverse, la masse liquide soumise à un refroidissement suffisant revient à l'état solide, elle rend au milieu ambiant toute la chaleur que la fusion avait absorbée ; elle la rend en quantité précisément égale, si la masse est restée la même ; et, en effet, pendant tout le temps nécessaire à la solidification, quelque intense que soit la cause du refroidissement, la température reste fixe et égale à celle du point de fusion ; elle ne commence à s'abaisser au-dessous de ce point que si la masse entière est solidifiée. Si le corps est de nature à rester liquide, dans des circonstances que nous avons étudiées, à une température inférieure à celle de la fusion, s'il y a en un mot *surfusion*, la chaleur latente redevient sensible

spontanément au moment du retour à l'état solide : la température remonte subitement au point de fusion.

C'est le docteur Black, avons-nous dit, qui, dès 1762, appela l'attention des physiciens sur l'existence de la chaleur latente de fusion, ou mieux sur le fait de l'absorption de chaleur due au changement d'état. Il fit plus : il chercha à la mesurer et employa à ce sujet diverses méthodes, et notamment celle des mélanges. Il trouva qu'un poids donné de glace absorbe, pour se fondre, 80 fois autant de calories que la même masse d'eau pour élever sa température de 1 degré : en mélangeant en effet des poids égaux d'eau à 80° et de glace fondante, Black obtint la fusion complète de la glace, sans que la température finale du liquide se fût élevée sensiblement au-dessus de zéro. Lavoisier et Laplace déterminèrent la chaleur de fusion de la glace à l'aide de leur calorimètre. Wilcke plongeait dans l'eau bouillante deux ballons, l'un plein d'eau à 0°, l'autre de neige aussi à 0° : il observait et comparait les températures des deux liquides, quand celle de l'eau du ballon plein d'eau s'était élevée à 72°.

Ces premières recherches, par des méthodes qui comportaient, ainsi que nous l'avons déjà vu, diverses causes d'erreur, donnèrent, en moyenne, un chiffre trop faible pour la chaleur latente de fusion de la glace, c'est-à-dire 75 calories, au lieu de 79. Le résultat trouvé par Black était plus rapproché de la vérité.

De la Provostaye et P. Desains ont déterminé avec une grande précision la chaleur latente de fusion de la glace par la méthode des mélanges. Ils procédèrent de la façon suivante. Ils introduisaient dans leur calorimètre en laiton très mince, rempli d'un poids donné d'eau, à une température supérieure à 0° et connue, un morceau de glace bien pure à 0°. Agitant alors l'eau du vase jusqu'à ce que la fusion du morceau de glace fût complète, ils notaient avec soin la température finale et pesaient le calorimètre : l'augmentation de poids correspondait à la quantité de glace fondue.

Ils avaient ainsi tous les éléments pour écrire l'équation très

simple donnant la solution du problème : d'une part, le nombre de calories perdues par l'eau du calorimètre, pour s'abaisser d'un nombre déterminé de degrés ; d'autre part, le nombre de calories nécessaire à la fusion, augmenté de celui que l'eau de fusion a absorbé pour passer de 0° à la température finale du mélange[1]. Il fallait, il est vrai, tenir compte de l'influence du vase et de celle du thermomètre, et ajouter leur *valeur en eau* au poids de l'eau du calorimètre ; puis faire les corrections, d'ailleurs très petites, provenant des pertes et des gains de chaleur qui pouvaient se produire pendant l'expérience.

Le nombre trouvé par les deux physiciens pour la chaleur latente de fusion de la glace est sensiblement égal à 79,25. Tel est le nombre de calories qu'exige 1 kilogramme de glace à 0° pour être réduit en eau également à 0°. Les déterminations de Regnault ont conduit au même résultat.

La méthode ainsi employée peut s'appliquer à tout autre solide dont la température du point de fusion est suffisamment basse, par exemple au brome, au mercure. S'il s'agit de corps dont le point de fusion soit élevé, comme la plupart des métaux, la méthode des mélanges s'applique encore, pourvu toutefois qu'on renverse l'ordre des phases du phénomène, c'est-à-dire en faisant préalablement fondre le corps solide, puis en cherchant la quantité de chaleur qu'il abandonne en se solidifiant. Mais il y a des précautions à prendre : le liquide devra être pris dans une masse non fondue en totalité, ou commençant seulement à se solidifier, afin qu'on soit sûr que sa température, au moment de l'introduction dans le calorimètre, est bien égale à celle du point de fusion. En outre, si la température de fusion du corps dépasse de beaucoup 100°, on ne le mettra point immédiatement en contact avec l'eau du calorimètre, qui produirait une formation brusque de vapeur dont l'effet thermique serait d'une appréciation difficile. On le renferme alors

1. $P(T - \theta) = px + p\theta$. P est le poids de l'eau du calorimètre, T sa température au moment de l'introduction de la glace ; p est le poids de la glace fondue, θ la température finale ; x est la chaleur latente de fusion cherchée.

dans une boîte métallique qu'on introduit dans l'eau, et c'est seulement vers la fin de l'expérience qu'on laisse celle-ci pénétrer dans la boîte au contact du liquide.

Quoique simple en théorie, la mesure de la chaleur latente de fusion des solides qui se liquéfient à une température élevée, présente de grandes difficultés pratiques, et exige des précautions multipliées. Person, à qui la science doit une série importante d'expériences sur ce point difficile, a signalé une importante relation entre les chaleurs latentes de fusion des métaux et leur élasticité. Plus celle-ci est grande, c'est-à-dire plus le poids nécessaire pour allonger d'une fraction donnée un fil de ce métal est considérable, plus grande aussi est sa chaleur latente de fusion. Le même savant a formulé une loi empirique qui rattacherait la chaleur latente de fusion d'un corps à ses chaleurs spécifiques sous les deux états solide et liquide. En voici l'énoncé : *La chaleur latente de fusion d'un corps est égale à la différence entre ses chaleurs spécifiques sous les deux états multipliée par le nombre de degrés qui sépare le point de fusion de la température* — 160°[1]. La chaleur latente ainsi calculée est en effet, pour un certain nombre de corps, très sensiblement égale à la chaleur mesurée.

Terminons ce paragraphe en donnant, d'après le même physicien, la chaleur latente de fusion des corps suivants :

1. Cette température de 160 degrés au-dessous de zéro (nombre trouvé par Pouillet pour la température des espaces planétaires, défalcation faite du rayonnement solaire) serait, d'après Person, celle du *zéro absolu*. Pour arriver à cette conclusion, le savant physicien a cherché, en s'appuyant sur la loi formulée plus haut, quelle serait la quantité totale de chaleur contenue dans un corps, par exemple dans 1 gramme d'eau à 0°. Il parvint à résoudre ce problème en admettant que les quantités totales de chaleur contenues dans deux corps différents sont entre elles comme leurs chaleurs spécifiques, et que ce rapport est constant pour toutes les températures. Il trouva 160 calories pour 1 gramme d'eau à 0°, 80 calories pour 1 gramme de glace aussi à 0°. Pour un autre corps dont la chaleur spécifique à l'état solide est c et qui est pris à 0°, on a donc une chaleur totale égale à 160 c. D'où il conclut que, si l'on enlève à ce corps 160 fois le nombre de calories faisant varier la température de 1°, il ne renfermera plus de chaleur : il sera au zéro absolu. Nous avons vu plus haut les raisons qui font adopter aujourd'hui la température — 273° pour ce point de départ, d'ailleurs tout théorique.

Glace (eau solide). . .	79,25	Étain	14,25
Phosphate de soude. . .	66,80	Bismuth.	12,64
Azotate de soude	62,97	Soufre.	9,37
Chlorure de calcium. . .	40,70	Plomb.	5,37
Zinc.	28,13	Phosphore.	5,03
Argent	21,07	Mercure.	2,83

§ 2. CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION.

C'est encore le docteur Black qui découvrit et essaya le premier de mesurer la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Il fit, dans ce but, l'expérience suivante. Il mettait sur un fourneau, dont il supposait la température à peu près constante, un vase plein d'eau. Il comptait le temps qui s'écoulait jusqu'au moment où le liquide entrait en ébullition, puis comparait à ce temps celui que mettait l'eau à se transformer entièrement en vapeur. Le rapport des deux nombres était celui des quantités de chaleur fournies par le foyer et absorbées, soit pour l'élévation de température de l'eau à 100°, soit pour sa vaporisation. Il employa aussi un procédé dont Watt se servit également et qui consistait à élever l'eau d'une marmite de Papin à une température supérieure à 100°. Ouvrant alors la soupape, une certaine quantité d'eau s'échappait à l'état de vapeur; l'eau restante retombait à 100°, et la chaleur latente de vaporisation était égale à la chaleur perdue par l'eau dans cet abaissement de température.

Des méthodes plus précises ont été adoptées depuis, et nous allons décrire celle qu'a imaginée Rumford et qui, convenablement perfectionnée, a été employée par Despretz pour déterminer les chaleurs latentes de vaporisation de divers liquides, l'eau, l'éther, l'alcool, le sulfure de carbone, à la température de leur ébullition à l'air libre.

Le principe de cette méthode est fort simple. Il consiste à recueillir et à peser le liquide provenant de la condensation de la vapeur traversant un serpentin métallique plongé dans l'eau d'un calorimètre. La figure 127, qui représente l'appareil de

Despretz, va nous permettre de suivre toute l'expérience. C'est une cornue à col incliné, qui contient le liquide en expérience; un thermomètre pénétrant à l'intérieur de la cornue fait connaître la température exacte de la vapeur au moment de l'ébullition. Le col de la cornue peut être entouré de drap pour éviter le refroidissement et la condensation de la vapeur; en tout cas, grâce à son inclinaison, le liquide qui pourrait résulter de cette condensation retombe dans la panse. Le

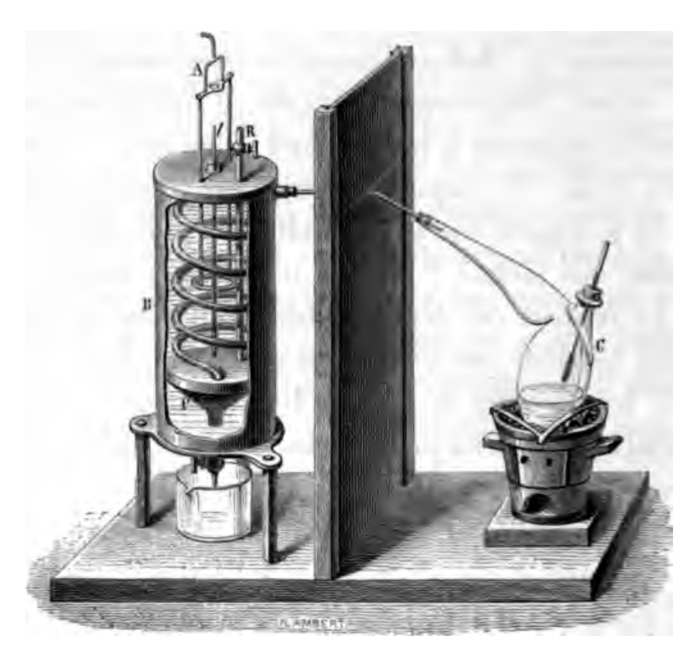


Fig. 127. — Calorimètre de Despretz, pour la mesure de la chaleur latente de vaporisation.

calorimètre B rempli d'eau froide contient un serpentin dont la vapeur traverse les spires en sortant du col de la cornue. Le liquide provenant de la vapeur condensée se rend dans le vase conique P complètement fermé. Le thermomètre *l* donne la température de l'eau du calorimètre au commencement et à la fin de l'expérience. Quand celle-ci est finie, on recueille et on pèse le liquide provenant de la condensation, et l'on a tous les éléments nécessaires au calcul de la chaleur latente de la vapeur, à la température et sous la pression observées. Le

vase P est d'ailleurs muni d'un tube qui débouche hors du calorimètre, et ce tube peut être mis à volonté en communication, par un robinet R, avec une machine pneumatique ou une pompe de compression. Dès lors on peut faire varier la tension de la vapeur ou, ce qui revient au même, la température à laquelle se produit l'ébullition du liquide.

Il y a lieu, bien entendu, de prendre ici les précautions usitées pour éviter les pertes de chaleur par conductibilité ou par rayonnement, et d'en tenir compte dans les calculs.

Nous avons dit que la méthode s'applique à tous les liquides vaporisables, et on le comprend aisément. Mais il était important surtout de connaître avec exactitude la chaleur latente de la vapeur d'eau, à toutes les températures et sous toutes les pressions ; c'est un point qui intéressait la théorie aussi bien que la pratique des machines à vapeur. Les expériences de Watt, faites à une époque où les méthodes et les appareils manquaient de précision, avaient fait admettre une loi connue sous le nom de *loi de Watt*, d'après laquelle il fallait toujours la même quantité de chaleur pour transformer en vapeur un poids donné d'eau, un gramme par exemple, pris à zéro. Cette quantité totale se compose de deux parties, la chaleur employée à échauffer l'eau jusqu'à l'ébullition, et la chaleur latente de vaporisation. D'autre part, on admettait que cette dernière est constante sous toutes les pressions.

Dans le but de vérifier l'exactitude de ces lois, Regnault entreprit une longue série d'expériences sur la chaleur latente de la vapeur d'eau, avec toute la précision qui caractérise ses immenses travaux sur la chaleur. Il détermina ainsi la chaleur de vaporisation de l'eau pour toutes les températures comprises entre 0° et +230°, c'est-à-dire entre les pressions de 0^{m},004 et 27 atmosphères. Ce grand travail, terminé en 1845, permit à l'illustre physicien de conclure que la chaleur latente de la vapeur d'eau va en diminuant à mesure que croît la température. A 0°, elle est égale à 607 ; à 100°, elle n'est plus que 537 ; à 200°, elle tombe à 464. Si, au contraire, on con-

sidère la chaleur totale, celle qui est nécessaire pour réduire en vapeur un poids d'eau égal à l'unité, pris à 0°, on trouve qu'elle est constamment croissante. A 0°, elle est égale à 607; à 100°, elle vaut 637; à 200°, 664[1].

Ces deux lois, qui contredisent la loi de Watt et celle de Southern (égalité de la chaleur latente sous toutes les pressions), ont été reconnues vraies par Regnault pour les liquides suivants, dont il a déterminé les chaleurs latentes de vaporisation : sulfure de carbone, éther, benzine, chloroforme, acétone. Il est probable qu'elles sont générales.

Dans leurs nombreuses et remarquables recherches calorimétriques, principalement appliquées à l'étude des phénomènes de thermochimie, Favre et Silbermann se sont servis d'un appareil fondé sur un principe tout différent de ceux que nous avons décrits. C'est le calorimètre à mercure, qui peut également mesurer les chaleurs spécifiques, les chaleurs latentes et celles développées par les combinaisons chimiques. Il se compose, ainsi que le montre la figure 128, d'un réservoir sphérique en fer R, suspendu sur un axe horizontal et pouvant basculer autour de cet axe. Deux robinets situés à la partie inférieure permettent, en retournant la sphère, de la remplir de mercure, l'un des robinets servant à faire le vide dans le réservoir, et l'autre à introduire le liquide. Quand il est plein, on retourne le réservoir après avoir fermé les robinets, et l'on met le tube que l'on voit s'élever à gauche, en communication avec un tube capillaire horizontal *ll'* soigneusement gradué. Une boule E remplie de mercure est interposée entre le tube c

1. Si l'on appelle Q la chaleur totale de vaporisation d'un liquide, λ sa chaleur laten c sa chaleur spécifique moyenne à l'état liquide, on a

$$Q = \lambda + cT,$$

si T est la température d'ébullition. Pour l'eau, la formule déduite empiriquement d recherches par M. Regnault est celle-ci :

$$Q = 606,5 + 0,305\,T,$$

et comme $\lambda = Q - T$, puisque $c = 1$, il en résulte pour la chaleur latente de vapo de l'eau à une température quelconque :

$$\lambda = 606,5 - 0,695\,T.$$

le réservoir, de manière à empêcher la rentrée de l'air dans celui-ci. Une vis métallique qu'on manœuvre à l'aide de la manivelle M permet d'enfoncer un piston plongeur P dans le mercure, et d'amener le sommet du liquide en un point fixe *o* du tube thermométrique. Quand, pour une cause quelconque, la température du mercure du calorimètre varie, s'élève ou s'abaisse, le niveau dans le tube s'avance ou se retire et l'on peut en étudier et en mesurer les mouvements à distance, en regardant au moyen de la lunette L le tube et l'échelle graduée qu'il porte. Fabre et Silbermann commencèrent par noter le nombre

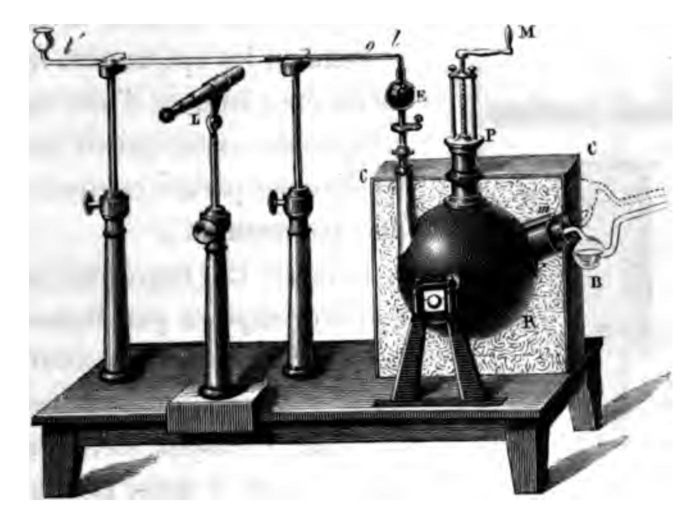
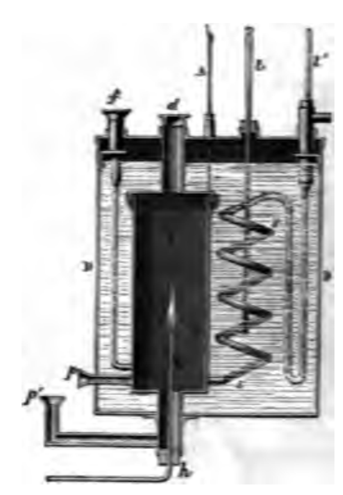


Fig. 128. — Calorimètre à mercure de Favre et Silbermann.

de divisions parcourues par la colonne de mercure pour chaque calorie cédée ou enlevée au calorimètre. Ils obtenaient cette évaluation en portant à l'ébullition un poids d'eau connu renfermé dans la pipette B; en renversant la pipette dans la position qu'indique le contour ponctué de la figure, ils faisaient couler l'eau dans la moufle *m*, où elle se refroidissait à la température ambiante, en cédant au mercure un nombre de calories aisé à calculer. Divisant alors par ce nombre le déplacement total du mercure dans le tube capillaire, ils trouvaient combien de divisions correspondaient à une calorie.

On comprend maintenant de quelle façon les expérimenta-

teurs procédaient pour mesurer une chaleur latente de vaporisation, la chaleur dégagée dans une combinaison chimique, etc. Ils introduisaient dans la moufle, à l'aide de la pipette, la vapeur du liquide chauffé à l'ébullition à une température connue; cette vapeur, en se condensant dans la moufle, cédait sa chaleur au mercure, et la lecture du déplacement du niveau dans le tube *ll'* faisait connaître le nombre de calories cédées par un poids donné de vapeur condensée. Pour mesurer une chaleur de combinaison, on introduisait successivement dans la moufle les matières entre lesquelles devait se faire la réaction.


Fig. 129. — Calorimètre à combustion de Dulong.

Pendant les opérations, le calorimètre était entouré d'une caisse CC remplie de ouate, qui en protégeait les diverses parties contre les pertes du rayonnement[1].

La figure 129 représente un calorimètre employé par Dulong pour mesurer la chaleur de combustion d'un composé quelconque, d'un gaz par exemple. Celui-ci arrive par le tube *h* dans la chambre à combustion C et l'oxygène nécessaire à la combustion par les tubes *f* ou *p'*. Les produits de la réaction vont s'échapper, au sortir de la chambre, à travers un

1. Dans une leçon consacrée à l'analyse des travaux de Favre, Henri Sainte-Claire Deville appréciait en ces termes le remarquable appareil que nous venons de décrire : « Le calorimètre à mercure fait fonction d'une vraie balance qui mesure l'action de la chaleur par l'effet thermométrique qu'il communique à une grande masse de mercure. Je me suis servi de cet instrument, et je dois avouer que, pour le manier, il faut avoir acquis une certaine expérience. L'instrument doit fonctionner en même temps comme un appareil qui reçoit une action calorifique, et qui, tout en restant à une température extrêmement voisine de la température extérieure, tout en étant isolé des causes perturbatrices par des précautions nombreuses et variées, doit fonctionner en même temps comme un appareil dont le refroidissement ou l'échauffement n'est pas à négliger, quoique suffisamment faible. Je dis que c'est une balance, parce que M. Favre s'en est servi pour étudier les phénomènes calorifiques en les appréciant en qualité et en quantité, comme un chimiste fait une analyse et pèse successivement tous les corps qu'il dose. »

serpentin plongé comme elle dans l'eau froide du calorimètre. Des thermomètres tt' mesurent, l'un la température de l'eau, l'autre celle des produits de la combustion à leur sortie du calorimètre, et ces deux températures doivent être égales si l'expérience est bien conduite.

Dulong a trouvé, par cette méthode, que la chaleur dégagée par 1 gramme d'hydrogène brûlant dans l'oxygène et produisant de l'eau, est égale à 34601 calories, ou $34^c,601$, suivant qu'on prend pour unité de calorie la chaleur nécessaire à 1 gramme ou à 1 kilogramme d'eau pour élever sa température de 1 degré. Favre et Silbermann ont trouvé 34462. Voici du reste quelques résultats obtenus par ces deux derniers physiciens pour la chaleur de combustion de divers corps simples brûlant dans l'oxygène :

Corps simples ou composés.	Chaleur dégagée par 1 gramme de combustible.
Hydrogène	34 462 calories
Charbon ordinaire	8 080 —
Graphite naturel	7 797 —
Diamant	7 770 —
Soufre natif	2 162 —
Sulfure de carbone	3 400 —
Alcool	7 184 —
Essence de térébenthine	10 852 —
Acide stéarique	9 616 —
Éther	9 028 —
Huile d'olive	9 862 —

La chaleur dégagée par la combustion dépend non seulement du combustible (et l'on voit, par exemple, qu'elle diffère considérablement du soufre à l'hydrogène), mais pour le même corps elle varie avec le gaz comburant. C'est ainsi que Favre et Silbermann ont trouvé 23 950 calories pour la chaleur de combustion de l'hydrogène dans le chlore. Nous ne faisons qu'effleurer ce sujet de la calorimétrie appliquée à l'étude des réactions chimiques. Les importants résultats obtenus dans cette voie forment la base d'une science toute nouvelle, qui n'est plus du domaine de cet ouvrage, la THERMOCHIMIE.

§ 3. INFLUENCE DE LA CHALEUR LATENTE DE LA VAPEUR D'EAU, DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DE L'EAU ET DE LA GLACE, SUR LES CLIMATS.

De toutes les substances que les physiciens ont étudiées pour déterminer leurs chaleurs spécifiques sous les trois états, ainsi que leurs chaleurs latentes de liquidité et d'élasticité, il n'en est pas qui méritent autant l'attention que l'eau. C'est un corps si universellement répandu dans la nature, ou du moins à la surface du globe terrestre, que le rôle qu'il joue dans les phénomènes météorologiques est nécessairement considérable, soit qu'il affecte la forme solide dans les climats polaires et en hiver dans les régions tempérées, soit qu'il se montre sous la forme liquide dans l'océan, les lacs et les fleuves, les nuages, ou enfin sous celle de gaz ou de vapeur dans l'atmosphère. Les variations de la température et des changements d'état de l'eau sont le point de départ ou la cause d'une multitude de changements qui nous affectent et nous intéressent à mille points de vue. D'autre part, l'usage de l'eau dans la vie domestique et dans l'industrie n'a pas pour nous une moindre importance, et nous le verrons bien, quand nous traiterons des applications de la chaleur et décrirons les machines qui ont la force élastique de la vapeur d'eau pour principe moteur. Nous avons déjà dit, en effet, que c'est en vue de cette dernière application que la plupart des travaux des physiciens sur la chaleur ont été entrepris; c'est sur les résultats de ces mêmes travaux que sera définitivement fondé le plus grand édifice scientifique du dix-neuvième siècle dans le domaine des sciences physiques, la théorie mécanique de la chaleur.

Pour des raisons presque semblables, l'air et la façon dont il se comporte sous l'action de la chaleur, jouent un rôle non moins considérable que l'eau dans les phénomènes de la physique terrestre.

Rappelons donc quelques-uns des nombres qui sont relatifs aux chaleurs spécifiques de l'air et de l'eau, et aux chaleurs

latentes de ce dernier corps. La chaleur spécifique de l'eau étant 1, celle de la glace à 0° est 0,513, celle de l'air, 0,2375. D'autre part, pour fondre 1 kilogramme de glace à 0°, il faut dépenser une quantité de chaleur égale à 79 calories environ ; il faut 607 calories pour réduire en vapeur 1 kilogramme d'eau à 0°, 592 calories si le même poids est à la température de + 15°, 537 calories s'il est à + 100°. Les mêmes quantités de chaleur sont dégagées par l'eau si le changement d'état est inverse, c'est-à-dire si le kilogramme d'eau se transforme en glace, ou le kilogramme de vapeur en eau liquide.

De ces nombres retenons d'abord ceux qui se rapportent à l'eau et à l'air. La chaleur spécifique de l'eau est un peu plus de quatre fois aussi grande que celle de l'air. Il suit de là qu'un poids d'eau de 1000 kilogrammes, en se refroidissant de 1 degré, dégage une quantité de chaleur suffisante pour élever aussi de 1 degré un poids de 4210 kilogrammes d'air. Mais 4210 kilogrammes d'air occupent, sous la pression barométrique normale et à 0°, un volume qui est 770 fois celui d'un même poids d'eau, c'est-à-dire égal à 3250 mètres cubes. Les conséquences de ce fait sont exprimées de la façon suivante par Tyndall, dans son ouvrage sur la *Chaleur* : « La grande influence que l'Océan doit exercer comme modérateur du climat se présente ici d'elle-même. La chaleur de l'été est emmagasinée dans l'Océan, et lentement abandonnée pendant l'hiver. C'est là un obstacle aux températures extrêmes pour les îles. Les étés des îles ne peuvent jamais atteindre la chaleur brûlante de l'été des continents, et l'hiver des îles ne peut jamais être aussi rigoureux que l'hiver des continents. Sur divers points du continent d'Europe, on cueille des fruits que nos étés (ceux d'Angleterre) ne peuvent pas mûrir ; mais aussi nos arbres toujours verts y sont inconnus : ils ne peuvent pas y vivre pendant les hivers. L'hiver de l'Irlande est, en règle générale, plus doux que l'hiver de la Lombardie. » Toutefois, en citant ces remarques, qui nous paraissent justes, n'oublions pas que les faits particuliers rappelés par Tyndall ne dépendent

pas seulement du voisinage de l'Océan, mais aussi de l'élévation de la température que détermine, dans ces régions, le grand courant d'eau tiède connu sous le nom de Gulf-Stream. Les vents équatoriaux ne contribuent pas non plus pour une faible part aux phénomènes météorologiques en question. C'est ce que reconnaît du reste le savant physicien, lorsqu'il dit plus loin : « Nous savons maintenant que le Gulf-Stream et la diffusion de la chaleur par les vents et les vapeurs sont les causes réelles de la douceur du climat européen. » Mais la cause physique réside toujours principalement dans la grande chaleur spécifique de l'eau comparée à celle de l'air.

Sur une moindre étendue, les lacs jouent le même rôle que l'océan : la chaleur emmagasinée par l'eau adoucit la température des localités avoisinantes. Dans le courant de décembre 1879, le docteur Forel, ayant fait un sondage thermométrique dans les couches du lac Léman, a constaté que la température, qui était de 5°,6 à la surface et de 5°,4 à la profondeur de 170 mètres environ, s'était abaissée, en cinq jours, à la surface, à 5°,4 ; de sorte que, dans toute cette épaisseur l'eau du lac s'était refroidie, ou, si l'on veut, avait cédé à l'air une quantité de chaleur aisée à évaluer. En faisant le calcul d'après les données fournies par des sondages, le docteur Forel a trouvé la quantité de chaleur perdue par le lac pendant ces cinq jours égale à environ dix milliards de calories, « soit, dit-il, à la quantité de chaleur dégagée par la combustion de 1 250 000 tonnes de charbon, ou par la combustion d'un cube de charbon de 100 mètres de côté. Le ciel ayant été pendant les cinq jours généralement couvert par un voile de nuages, la plus grande partie de cette chaleur est restée dans l'air, et a ainsi contribué à atténuer, pour notre vallée, le froid qui sévissait si cruellement ailleurs. » (*La Nature*, tome I de 1880.)

La chaleur latente de fusion de la glace joue aussi un rôle important en météorologie. La fonte des neiges et des glaces accumulées pendant les saisons d'hiver se fait sous une double influence : directement par la chaleur que rayonne le soleil, ou

lement par celle qu'abandonnent les masses d'air chaud amenées par les vents venant des régions équatoriales. On verra plus loin comment a été mesurée la quantité de la chaleur due aux rayons solaires. Quant à celle de l'air, nous avons vu plus haut que sa valeur moyenne est au-dessous du quart de la chaleur spécifique de l'eau; mais comme celle-ci n'est que la 79e partie de la chaleur latente de fusion de la glace, on peut se rendre compte de la masse d'air chaud qui est nécessaire pour fondre un poids de glace ou de neige à 0°. Un mètre cube de glace à 0° pèse 930 kilogrammes et exige, pour être fondu à 0°, $930 \times 79{,}25$ calories. D'un autre côté, 1 mètre cube d'air à 0° pèse 1,293 kilogramme; mais, en supposant ce même volume d'air à $+15°$, température supposée du vent régnant, il ne pèsera plus que 1,293 kilogramme divisé par $1+\alpha t$ ou par $1+0{,}00367 \times 15 = 1{,}055$. Le nombre de mètres cubes d'air nécessaires à la fusion du mètre cube de glace se trouvera ainsi exprimé par $\frac{930 \times 79{,}25 \times 1{,}055}{0{,}2375 \times 15 \times 1{,}293}$, si l'on suppose que l'air soit lui-même réduit à la température de zéro. Le calcul donne 16900 mètres cubes environ. Si le vent régnant qui détermine la fusion n'a qu'une température de 10 ou même de 5 degrés, le nombre de mètres cubes nécessaires sera plus grand. On trouve alors 24880 mètres cubes ou 48900 mètres cubes dans l'une ou l'autre hypothèse.

On voit par ces nombres quel refroidissement doit résulter, pour l'atmosphère, de l'immense quantité relative de chaleur employée chaque année à la fonte des neiges et des glaces. La radiation solaire est, à la vérité, d'une telle puissance, qu'elle rétablit bientôt l'équilibre rompu par ces échanges de chaleur entre l'air et l'eau et par les variations de volume ou de densité qu'ils provoquent dans la masse mobile de l'enveloppe aérienne.

Si, comme on vient de le voir, les courants océaniques ou aériens qui arrivent des régions de l'équateur aux zones tempérées et polaires de chaque hémisphère, fournissent aux

climats correspondants assez de chaleur pour en adoucir la rigueur, par un procédé inverse les glaces des pôles vont tempérer l'extrême chaleur de la zone torride. Il est vrai, comme nous le verrons plus tard, que des courants de sens opposés au sein des mers et de l'air contribuent à ce résultat; mais ici nous ne considérons que l'abaissement de température provenant de la fusion de la glace. On sait en effet que, tous les printemps, les glaciers et les banquises des pôles subissent, par le retour du soleil, une débâcle qui en fait détacher des masses souvent considérables. Les îles flottantes connues sous le nom d'*icebergs*, dont nous avons eu déjà l'occasion de parler dans le premier volume[1] de cet ouvrage, sont entraînées par les courants dans les régions de plus en plus chaudes de l'Atlantique ou du Pacifique. Elles finissent par s'y fondre peu à peu, mais non sans absorber pour cela une quantité de chaleur considérable, qu'elles empruntent nécessairement pour la plus grande part aux masses liquides de ces deux océans. Les dimensions de ces blocs de glace mesurent souvent des centaines de mètres dans tous les sens, et leurs volumes, plusieurs millions de mètres cubes. La fusion de l'un d'eux exige donc une dépense de chaleur qui peut se chiffrer par des centaines de milliards de calories!

1. MONDE PHYSIQUE, t. I, p. 136 et 137.

CHAPITRE XII

PROPAGATION DE LA CHALEUR — CHALEUR RAYONNANTE

§ 1. PROPAGATION DE LA CHALEUR DANS LE VIDE ; SA VITESSE.

En décrivant les effets de la chaleur sur les corps, effets qui modifient leur volume ou changent leur état physique, nous n'avons rien dit de la manière dont s'effectue le passage de la chaleur, de la source au corps échauffé. Quand deux corps sont en présence, soit au contact, soit à distance, l'expérience prouve qu'il y a entre eux échange de chaleur, pour peu que leurs températures soient inégales, de sorte que chacun d'eux est une source de chaleur pour l'autre ; mais le plus souvent on réserve le nom de source calorifique à celui des deux corps qui a la température la plus élevée. Ce que nous avons à étudier maintenant, ce sont les divers modes de propagation de la chaleur, quand elle passe d'une source à un corps qui en est plus ou moins éloigné, ou qu'elle se propage dans divers milieux.

L'expérience nous montre deux modes principaux de propagation de la chaleur ; voici des exemples de chacun d'eux, que l'on pourra aisément multiplier, en se reportant aux observations que nous pouvons avoir l'occasion de faire tous les jours. Quand on tient à la main, par une de ses extrémités, une barre de fer froide et qu'on met au feu l'autre bout, il s'écoule un certain temps avant que la chaleur du foyer, se

propageant successivement le long de la barre, vienne se faire sentir à notre organe; plus la barre est courte, moins cet intervalle de temps est long, et d'ailleurs l'intensité de la chaleur ainsi propagée va en croissant à partir du moment de la première impression, si l'on maintient la barre dans le foyer. Ici la chaleur a cheminé tout le long du métal et de molécule à molécule; c'est par l'intermédiaire des parties matérielles qu'elle a été ainsi conduite d'une extrémité à l'autre de la barre de fer, et enfin transmise à la main par le contact. C'est un exemple de propagation de la chaleur par *conductibilité*. C'est de la même façon que s'élève la température des parois extérieures d'un vase, à l'intérieur duquel on a versé de l'eau chaude.

Il n'en est plus ainsi quand la chaleur d'un foyer incandescent se communique au visage d'une personne qui vient d'enlever brusquement l'écran à l'aide duquel elle se préservait d'abord de la température de la source. Dans ce cas, la rapidité de l'impression subie nous prouve que ce n'est pas en échauffant de proche en proche l'air interposé entre le feu et le visage que la chaleur du foyer s'est propagée, mais par un mode de mouvement analogue à celui de la lumière émanée d'une source. On dit alors que la chaleur se propage par *rayonnement*, et l'on appelle *chaleur rayonnante* celle qu'envoient les sources par ce mode de transmission à distance.

En résumé, quand une source de chaleur se trouve en présence et à une certaine distance d'un corps, elle peut de deux manières en élever la température : soit en échauffant d'abord successivement, molécule à molécule, toutes les parties matérielles qui se trouvent interposées entre le corps et la source; soit en échauffant directement le corps, sans que l'élévation de température des parties intermédiaires soit une condition nécessaire à l'élévation de température du corps. La chaleur se propage par *conductibilité* dans le premier cas; dans le second, c'est par *rayonnement*.

Comme les autres modes de propagation de la chaleur

peuvent se ramener à l'un ou à l'autre de ceux-ci, ou à leur combinaison, nous allons les étudier chacun à leur tour. Commençons par la chaleur rayonnante.

L'action des rayons solaires, qui se fait sentir à une distance de 37 millions de lieues, prouve que la chaleur n'a pas besoin, pour se propager, de l'intermédiaire d'un milieu pondérable; et en réalité, quand, après avoir franchi les espaces interplanétaires, elle traverse l'atmosphère et arrive à la surface du sol, elle échauffe celui-ci directement, sans avoir élevé d'une manière sensible la température des couches supérieures de l'air, ainsi que le prouve le froid qui règne dans les hautes régions de l'air et sur les montagnes élevées.

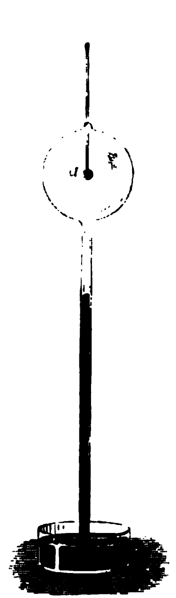


Fig. 130. — Rayonnement de la chaleur obscure dans le vide.

La chaleur rayonne de tous les corps incandescents que nous pouvons observer à la surface de la Terre, de la même façon que la chaleur émanée du Soleil. La chaleur obscure jouit aussi de la même propriété, c'est-à-dire se propage d'un point de la source à une distance quelconque, par rayonnement direct, sans que l'échauffement des points intermédiaires soit une condition de la propagation. Une expérience de Rumford a mis ce résultat hors de doute. Il construisit un baromètre dont le tube était terminé, à sa partie supérieure, par un ballon au centre duquel aboutissait la boule *a* d'un thermomètre : le ballon formait ainsi la chambre barométrique de l'instrument, de sorte que sa capacité était entièrement vide de matière pondérable (fig. 130). Ayant alors fermé au chalumeau et détaché le ballon, il plongea la partie inférieure de ce dernier dans l'eau bouillante : à l'instant, le thermomètre monta, effet qui ne pouvait être attribué qu'au rayonnement dans le vide de la chaleur communiquée par l'eau à la paroi intérieure du ballon. L'échauffement qui se produit de la sorte ne peut d'ailleurs

La vitesse de propagation de la chaleur rayonnante paraît être du même ordre que la vitesse de la lumière. A la surface de la Terre, sa transmission est instantanée, ou du moins on n'a jamais pu constater aucun intervalle de temps appréciable entre le moment où l'on retire un écran qui intercepte un faisceau de rayons calorifiques et celui où il commence à produire son effet sur les thermoscopes les plus sensibles. Des expériences de ce genre ont été faites par Mariotte, puis par Pictet, à des distances assez petites, il est vrai (100 mètres, et 23 mètres environ). Nous verrons plus loin qu'il est généralement admis que le rayonnement de la chaleur se fait, comme celui de la lumière, par l'intermédiaire des ondulations de l'éther; qu'il n'y a, entre les ondulations calorifiques comme entre les ondulations lumineuses, que des différences de longueur d'onde ou de vitesse du mouvement vibratoire ; que d'ailleurs toutes les lois régissant les phénomènes de la lumière se vérifient ou trouvent leur application dans les phénomènes de chaleur rayonnante. On en conclut que la vitesse de propagation de celle-ci est la même que celle de la lumière, c'est-à-dire d'environ 300 000 kilomètres par seconde. Le rayonnement qui provient des sources de chaleur obscure se fait-il avec la même rapidité que celui qui émane des sources de chaleur lumineuse? C'est ce qu'aucune expérience ne permet ni d'affirmer ni de contredire. Ce qu'on sait, c'est que les radiations d'une même source, lumineuse ou obscure, ne sont généralement pas simples : elles comprennent des rayons de qualités différentes; de plus, les sources qui, comme le soleil et les corps incandescents, rayonnent de la chaleur lumineuse, émettent simultanément des radiations obscures. Il est donc infiniment probable que la chaleur obscure se propage par rayonnement avec la même vitesse que la chaleur lumineuse.

Obscure ou lumineuse, la chaleur d'une source rayonne également dans tous les sens; comme celle de la lumière, son intensité décroît en raison inverse du carré de la distance à la source. Un corps, en rayonnant de la chaleur, se refroidit;

mais la rapidité avec laquelle sa température s'abaisse d'un certain nombre de degrés dépend de la nature de la substance, de l'état de sa surface, de sorte que les différents corps ont des pouvoirs rayonnants ou *émissifs* différents. En tombant sur la surface d'un corps, la chaleur émanée d'une source par voie de rayonnement y subit les mêmes changements que la lumière : une partie s'y réfléchit et retourne dans le milieu qu'elle avait traversé d'abord ; une autre partie est absorbée, et la proportion plus ou moins grande de ces deux quantités de chaleur dépend aussi de la nature du corps, de l'état de sa surface, etc., constituant ainsi ce qu'on nomme le *pouvoir réflecteur* du corps et son *pouvoir absorbant*. Nous supposons dans tout cela que la chaleur rayonne dans le vide, ou, si ce milieu est pondérable, qu'il se laisse traverser par les rayons calorifiques sans s'échauffer. Les milieux matériels, gazeux, liquides ou solides, qui jouissent de cette propriété de se laisser traverser librement par la chaleur rayonnante sans que leur température en soit sensiblement modifiée, ont été nommés *diathermanes* ou *diathermiques*, par Melloni, qui a donné au contraire le nom d'*athermanes* ou d'*adiathermiques* aux corps que la chaleur rayonnante ne peut traverser. Mais nous verrons que ces propriétés et les dénominations qui leur correspondent ne doivent pas être regardées comme absolues : telle substance, athermane sous une certaine épaisseur, devient diathermane à un certain degré pour une épaisseur plus petite. C'est là, comme on voit, une analogie de plus avec la lumière, pour laquelle les corps sont plus ou moins transparents, diaphanes ou opaques.

En passant d'un milieu dans un autre de densité différente, les rayons de chaleur subissent dans leur direction une déviation analogue à celle des rayons de lumière : ils se réfractent, et nous verrons que ce phénomène se manifeste aussi bien pour la chaleur obscure que pour la chaleur lumineuse. Enfin, la chaleur possède, comme la lumière, la propriété de la double réfraction et celle de la polarisation.

Nous allons successivement passer en revue tous ces phénomènes d'émission, de réflexion, d'absorption et de réfraction de la chaleur, en décrivant les principales expériences qui ont permis d'en connaître les lois.

§ 2. INTENSITÉ DE LA CHALEUR RAYONNANTE ; SES VARIATIONS.

La chaleur qui rayonne d'une source, se propageant en ligne droite et dans tous les sens, comme la lumière, son intensité varie suivant les mêmes lois que l'intensité lumineuse : elle est en raison inverse du carré des distances ; elle est aussi, pour une même distance, proportionnelle au cosinus de l'angle que fait la direction des rayons de chaleur avec la normale à la surface d'où ils émanent, ou sur laquelle ils tombent.

On démontre ces lois par le raisonnement aussi bien que par l'expérience. Pour le premier mode de démonstration, nous renverrons le lecteur au chapitre de la LUMIÈRE[1] où la même question se trouve traitée pour les rayons lumineux. Quant à la démonstration expérimentale, elle se fait d'une manière fort élégante dans les cours à l'aide de la pile thermo-électrique de Nobili. Mais, avant de dire en quoi elle consiste, nous devons reproduire ici la description de cet appareil, telle que nous l'avons donnée dans le tome III du MONDE PHYSIQUE[1]. Nous allons voir en effet Melloni faire un usage constant du *thermo-multiplicateur* pour l'étude des diverses propriétés de la chaleur rayonnante.

La pile thermo-électrique de Nobili est formée de la façon suivante. Une série de barreaux d'antimoine AAA... soudés bout à bout avec des barreaux de bismuth BBB... de même longueur est repliée de telle sorte (fig. 131) que toutes les soudures paires sont d'un même côté et les soudures impaires de l'autre. En reliant ces deux séries par deux fils qui partent des barreaux extrêmes, on a un circuit dans lequel un courant

1. Tome II du MONDE PHYSIQUE, p. 380.
2. Page 325.

électrique naîtra aussitôt qu'il y aura une différence de température entre les soudures opposées. On réunit un certain nombre d'éléments semblables en un paquet, auquel on donne la forme d'un prisme rectangle (fig. 132), dont deux faces

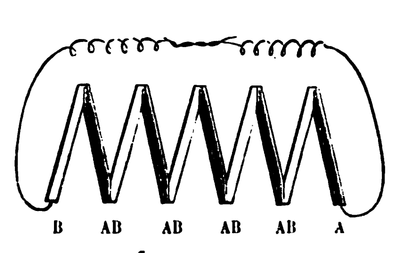


Fig. 131. — Élément de la pile thermo-électrique de Nobili.

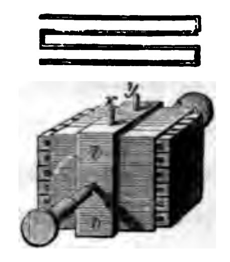


Fig. 132. — Disposition des barreaux dans le thermo-multiplicateur.

opposées se trouvent contenir, l'une toutes les soudures paires, l'autre toutes les soudures impaires des barreaux. Deux bornes fixées à deux faces latérales du prisme, communiquant l'une

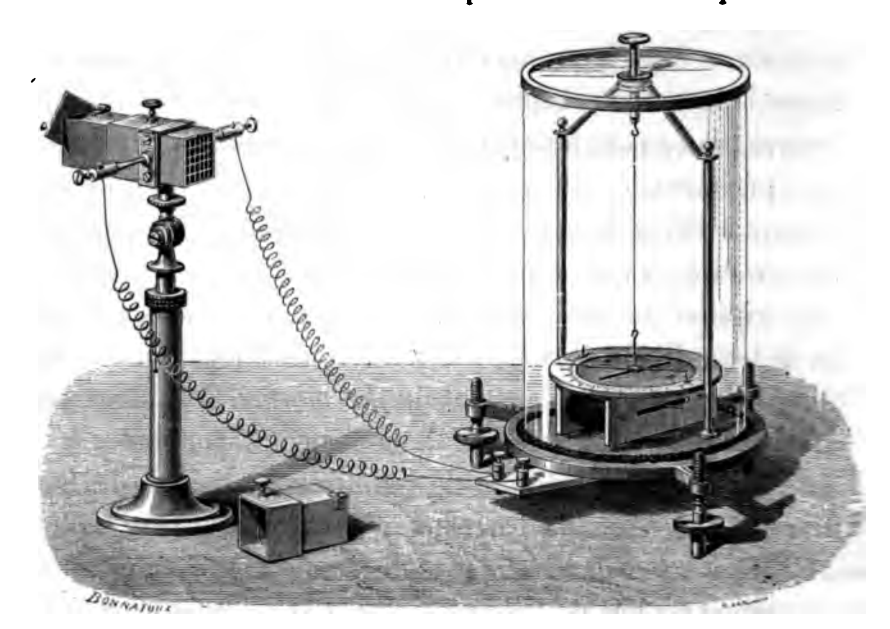


Fig. 133. — Pile thermo-électrique, ou thermo-multiplicateur de Nobili.

au premier barreau de bismuth, l'autre au dernier barreau d'antimoine, portent les rhéophores de la pile.

Quand on veut utiliser la pile de Nobili pour les recherches de radiation calorifique, on relie les deux pôles avec un galva-

nomètre (fig. 133); on protège les faces de la pile contre les variations irrégulières de température par des enveloppes en laiton de forme prismatique, munies d'opercules qu'on ferme ou qu'on ouvre à volonté. Dès qu'une source de radiation vient à agir sur l'une des faces de la pile, un courant est engendré, et l'on observe une déviation dans l'aiguille du galvanomètre. Le sens de la déviation dépend de la face qui est échauffée, et sa grandeur mesure l'intensité du courant qui lui-même, nous l'avons vu, peut servir à déterminer la différence de température des faces de l'appareil[1]. La pile thermo-électrique ainsi constituée est un instrument d'une grande sensibilité : il suffit de toucher du doigt l'une de ses faces, ou d'y envoyer par insufflation une bouffée d'air chaud, pour que l'aiguille aimantée éprouve une forte déviation.

L'intensité du courant, toutes choses égales d'ailleurs, est en raison du nombre des soudures, c'est-à-dire des éléments de la pile; c'est pour cette raison qu'on donne à l'appareil de Nobili le nom de *thermo-multiplicateur*.

Voyons maintenant comment, à l'aide de cet appareil, on arrive à vérifier la loi de la variation de l'intensité en raison inverse des carrés des distances. L'expérience suivante, due à Melloni, démontre fort simplement l'exactitude de la loi en question.

On munit une face de la pile thermo-électrique d'un cône qui limite les dimensions du faisceau de chaleur, et qui, recou-

1. Pour que la pile thermo-électrique soit un instrument de mesure, il est indispensable qu'elle soit graduée, c'est-à-dire que l'on connaisse la relation qui existe entre les déviations de l'aiguille du galvanomètre, mesurées en degrés, et les intensités des actions calorifiques qui produisent ces déviations. L'aiguille au 0 indique que ces intensités sont égales sur chaque face de la pile. Si alors on fait rayonner successivement sur l'une et sur l'autre deux sources de chaleur d'inégale intensité, on obtient deux déviations différentes, d et d'. En les faisant agir simultanément sans changer les distances, on observe une nouvelle déviation d''. Melloni admettait que si $d'' = d - d'$, c'est que, entre les déviations extrêmes d' et d'', les indications de l'appareil étaient proportionnelles aux actions calorifiques. C'est ce que l'observation donnait au-dessous de 20°. Au delà, il trouva $d < d' + d''$, et il admettait alors que les actions calorifiques qui donnaient les déviations telles que d étaient proportionnelles à la somme $d' + d''$, pourvu que d' et d'' fussent toutes deux inférieures à 20°.

MM. de la Provostaye et Desains graduaient l'appareil par une autre méthode, qui consistait à faire rayonner successivement sur la même face deux lampes à modérateur, isolément d'abord, puis les deux lampes ensemble.

vert intérieurement de papier noir, ne peut réfléchir la chaleur susceptible de tomber obliquement sur sa surface interne. Pour source de chaleur rayonnante, on emploie un vase de fer-blanc dont l'une des faces est recouverte de noir de fumée et qu'on remplit d'eau bouillante : c'est cette face dont le rayonnement vers la pile va nous servir à vérifier la loi. On place la pile munie de son cône en face du vase, à une distance donnée SO (fig. 134) ; l'aiguille du galvanomètre est déviée d'une certaine quantité, de 54° par exemple. On recule la pile à une distance double S'O ; la position de l'aiguille du galvanomètre reste constante : elle continue à marquer 54°, comme dans la pre-

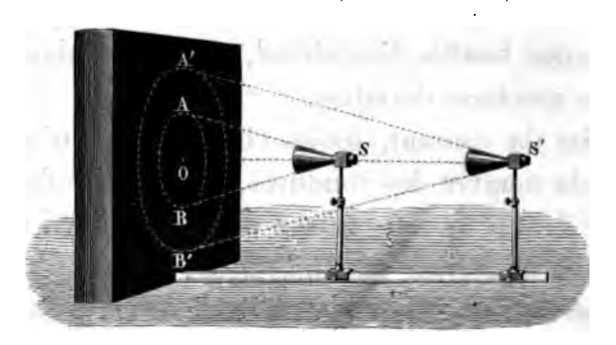


Fig. 134. — L'intensité de la chaleur rayonnante varie en raison inverse des carrés des distances. Démonstration expérimentale.

mière position de la pile. Il en est de même enfin pour toute autre distance. Dans chacune de ces positions, l'effet total du rayonnement est donc le même ; mais les parties de la surface du vase qui envoient des rayons de chaleur dans le cône ne sont autre chose que les sections du cône de l'appareil prolongé jusqu'à la surface rayonnante : tout point de l'une de ces sections rayonne directement sur la face de la pile tournée de ce côté, comme aussi tout rayon envoyé par le même point sur la surface interne noircie, et *à fortiori* en dehors, ne peut arriver à cette même face. Or ces sections sont de plus en plus grandes ; ce sont des cercles dont les diamètres AB, A'B' croissent proportionnellement à la distance de la pile au vase, et dont les surfaces vont dès lors en croissant comme les carrés de ces

distances mêmes. Il faut donc que l'intensité du rayonnement diminue en raison de ces mêmes carrés, pour que l'effet produit sur la pile reste constant. En un mot, l'augmentation de la surface rayonnante efficace est exactement compensée par la diminution de l'intensité avec la distance, et la loi se trouve démontrée.

Supposons maintenant que, sans faire varier la distance de la pile thermo-électrique à la source, on change l'inclinaison de la surface rayonnante; que la face *ca* (fig. 135), qui envoie un faisceau limité de chaleur dont les rayons sont émis normalement, soit inclinée en *c'a'*. Si, dans le premier cas, l'aiguille du galvanomètre subit une déviation marquée par 60°, dans le second cas l'aiguille conservera cette même position. En un

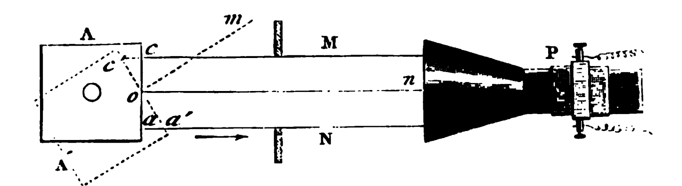


Fig. 135. — Loi des cosinus pour les rayons émis obliquement.

mot, la déviation restera constante, quelle que soit l'obliquité des rayons émis. La quantité de chaleur rayonnée vers la face de la pile est donc elle-même constante. Mais la portion *c'a'* de la surface qui émet le faisceau oblique est plus grande que la portion *ca* qui émet le faisceau normal. Il faut donc que l'intensité de la chaleur émise obliquement soit moindre que l'intensité de la chaleur rayonnée normalement. Pour qu'il y ait compensation, le rapport de ces intensités doit être inverse des dimensions des surfaces, c'est-à-dire des lignes *c'a'* et *ca*, ou directement proportionnel à *ca* et *c'a'*. En un mot, l'intensité de la chaleur émise obliquement varie comme le *cosinus* de l'angle que les rayons font avec la normale *om* à la surface rayonnante.

Cette loi, que Lambert avait posée comme un principe, Leslie l'avait démontrée avec l'appareil de son cube et de son

thermomètre différentiel dont l'une des boules était placée au foyer d'un miroir sphérique, appareil que nous retrouverons bientôt. Mais ses expériences n'avaient vérifié la loi que dans le cas du noir de fumée, c'est-à-dire d'une surface dénuée de tout pouvoir réflecteur. Et en effet, il a été reconnu depuis que la loi du cosinus n'est exacte que dans ce cas exceptionnel. MM. de la Provostaye et Desains l'ont vérifiée avec la pile de Nobili, qui accusait une déviation constante si la surface rayonnante était le noir de fumée, tandis que pour d'autres substances, le verre, la céruse, l'ocre rouge par exemple, la déviation de l'aiguille galvanométrique variait avec l'obliquité des rayons de chaleur. Cette inexactitude d'une loi qui semblait pouvoir se déduire du seul raisonnement, s'explique. Les

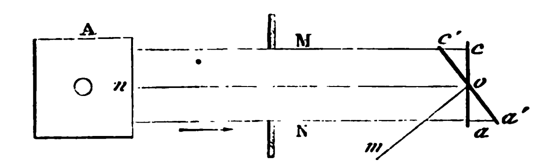


Fig. 156. — Loi du cosinus pour les rayons reçus obliquement.

rayons de chaleur qu'émet la surface d'un corps, en passant de l'intérieur à l'extérieur par la surface, subissent une double réflexion, interne et externe, et la chaleur émise n'est que la différence entre la chaleur totale qui arrive à la surface et la portion qui, réfléchie intérieurement, retourne dans le corps. Or celle-ci varie probablement avec l'inclinaison, comme varie en effet la chaleur extérieurement réfléchie.

Quant à la loi du cosinus appliquée à l'intensité de la chaleur rayonnante émise par une source A et reçue obliquement par la surface *c'a'*, elle est une simple conséquence géométrique de la variation des surfaces interceptées dans un faisceau limité, quand l'obliquité du plan de section varie[1]. Il n'y a pas lieu de la vérifier expérimentalement.

1. L'intensité de la chaleur reçue par *c'a'* est évidemment proportionnelle au cosinus de l'angle *n o m*.

§ 3. RÉFLEXION DE LA CHALEUR.

Quand des rayons de chaleur tombent à la surface d'un corps, ou, d'une façon plus générale, arrivent à la surface de séparation de deux milieux différents, leur faisceau se divise en deux parties : l'une d'elles pénètre à l'intérieur du corps ou du second milieu et elle s'y divise généralement elle-même en chaleur transmise et en chaleur absorbée, la première traversant le corps sans l'échauffer, la seconde étant au contraire susceptible d'en modifier la température. Une seconde partie du faisceau incident est renvoyée dans le milieu d'où il vient; comme la lumière, elle subit une réflexion. Nous avons dit déjà que les lois de cette réflexion sont les mêmes pour les rayons de chaleur que pour les rayons lumineux, c'est-à-dire que *le rayon incident et le rayon réfléchi sont tous deux dans un plan perpendiculaire à la surface réfléchissante, et qu'ils font le même angle avec la normale au point d'incidence*. La vérification expérimentale de cette identité se fait ordinairement de la façon suivante :

On place deux miroirs paraboliques concaves, en laiton poli, en regard l'un de l'autre, de façon que leurs axes principaux coïncident (fig. 137). Au foyer de l'un d'eux, on place une source calorifique, par exemple un petit panier en fil de fer contenant des charbons ardents, et au foyer de l'autre une substance inflammable, amadou, fulmi-coton, poudre. Au bout d'un temps très court, l'inflammation a lieu ; mais l'expérience ne réussit point si la substance inflammable est placée hors du foyer, alors même qu'on la rapprocherait ainsi de la source calorifique. Un tel effet est tout semblable à celui de la réflexion de la lumière dans les mêmes conditions, et ne peut s'expliquer que par la réunion et la concentration des rayons de chaleur partis du premier foyer. Leur faisceau divergent tombe sur la surface polie du premier miroir, s'y réfléchit, se transforme en un faisceau parallèle à l'axe commun, se réflé-

chit une seconde fois à la surface du second miroir et vient converger à son foyer. En un mot, les rayons de chaleur suivent, après leur réflexion, le même chemin qu'eussent suivi des rayons lumineux émanés du même point, et les propriétés géométriques de la parabole entraînent comme conséquence les deux lois formulées plus haut : 1° la coïncidence du rayon incident et du rayon réfléchi dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante ; 2° l'égalité des angles d'incidence et de réflexion.

L'expérience des miroirs paraboliques se fait sous des for-

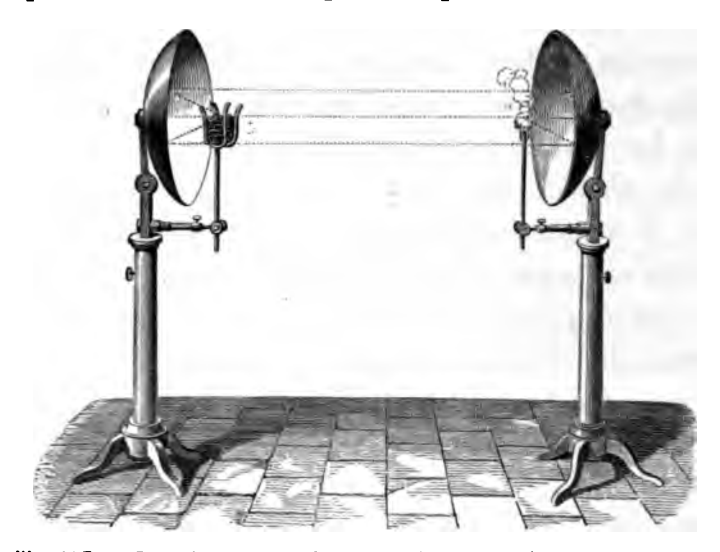


Fig. 157. — Réflexion de la chaleur ; expérience des miroirs paraboliques.

mes variées. On peut, par exemple, mettre à l'un des foyers une boule métallique portée à une température élevée, et à l'autre foyer le réservoir d'un petit thermomètre. La colonne mercurielle monte aussitôt, tandis que l'effet est nul si le thermomètre n'est pas placé exactement au foyer. Au lieu d'un thermomètre ordinaire, on emploie aussi l'une des boules du thermoscope de Rumford ou du thermomètre différentiel de Leslie : on s'affranchit ainsi des variations de température que le milieu peut subir pendant l'expérience, puisque les deux boules de l'instrument en ressentent également l'influence. On est donc assuré que les variations de l'index proviennent uni-

quement de la réflexion. Enfin, on comprend que la pile thermo-électrique de Nobili remplirait également bien cet office, en accusant, par la déviation instantanée de l'aiguille du galvanomètre, la concentration des rayons réfléchis au miroir du second foyer.

Les miroirs paraboliques ont l'avantage de la grande ouverture qui peut leur être donnée, et qui permet de les placer à une grande distance l'un de l'autre. Mais il est clair que l'expérience précédente réussira également si on leur substitue deux miroirs sphériques, ou même un seul miroir, pourvu qu'on ait soin de placer le corps chaud (ou la substance inflammable) et le thermomètre en deux points de l'axe qui soient deux des foyers conjugués. Cette dernière disposition est même plus avantageuse, en ce sens que les rayons de chaleur ne subissent qu'une seule réflexion et par conséquent éprouvent une moindre diminution dans leur intensité.



Fig. 138. — Expérience de Davy : réflexion de la chaleur dans le vide.

Les expériences que nous venons de relater se font dans l'air ; mais on doit à Davy une expérience élégante qui prouve que les lois de la réflexion de la chaleur sont les mêmes dans un milieu impondérable. On dispose sous le récipient de la machine pneumatique deux petits miroirs sphériques ou paraboliques, en laiton poli et argenté, dont l'axe commun est vertical. Au foyer du miroir inférieur on fixe la boule d'un petit thermomètre, et au foyer du miroir supérieur un fil de platine très fin enroulé en spirale. Les extrémités du fil sont soudées aux rhéophores d'une pile, fixés eux-mêmes, par deux boutons métalliques, aux tubulures latérales de la cloche qui forme le récipient. Le vide étant fait dans celui-ci, on ferme le circuit, et le courant de la pile, en passant au travers de la spirale de platine, la porte à l'incandescence. Le

thermomètre indique aussitôt une augmentation très sensible de température, qui ne peut être attribuée qu'à la réflexion de la chaleur développée. Si, en effet, on recommence l'expérience après avoir déplacé la boule du thermomètre, l'élévation de température marquée par l'instrument est, sinon tout à fait nulle, du moins beaucoup plus faible.

Mentionnons encore une expérience curieuse qui pourrait faire croire qu'il existe un rayonnement frigorifique, comme il existe des radiations de chaleur. Si l'on substitue un morceau de glace à l'une des sources de chaleur dont il vient d'être question, et si on le place bien exactement au foyer d'un des miroirs, on voit aussitôt baisser le thermomètre de l'autre miroir, comme s'il y avait eu réflexion de froid. La vérité est qu'en ce cas, comme dans tous les autres, il y a en présence deux corps à des températures inégales, qui rayonnent tous les deux de la chaleur. Il en résulte pour chacun d'eux une perte de chaleur, en partie compensée par le gain qui résulte du rayonnement de l'autre. Dans la première expérience, le thermomètre recevait plus qu'il ne perdait, et il en résultait un accroissement de température, une élévation du niveau du mercure. Dans l'expérience faite avec le morceau de glace, c'est le thermomètre au contraire qui perd plus de chaleur qu'il n'en reçoit; sa température diminue, et le niveau thermométrique s'abaisse en effet.


Fig. 139. — Miroir ardent.

On a utilisé les lois de réflexion de la chaleur pour obtenir une chaleur d'une très grande intensité au foyer d'un miroir

sphérique concave exposé aux rayons solaires. Avec un appareil de ce genre, qu'on nomme alors un *miroir ardent* (fig. 139), et auquel on donne une grande ouverture et un rayon de courbure considérable, on a fondu des métaux, vitrifié de la brique, de la pierre, etc. Nous reviendrons avec plus de détails sur ce sujet, quand nous traiterons des applications industrielles de la chaleur solaire et des appareils nouvellement imaginés en vue de cette utilisation.

§ 4. DU POUVOIR ÉMISSIF DES CORPS ; POUVOIR ABSORBANT, POUVOIR RÉFLECTEUR.

Pour les rayons de chaleur, comme pour les rayons de lumière, il y a deux sortes de réflexions subies par un faisceau qui tombe, sous une incidence quelconque, à la surface d'un corps : la réflexion *régulière* correspond à la partie du faisceau qui est renvoyée suivant les lois énoncées dans le précédent paragraphe; on donne le nom de *chaleur diffuse* à la portion qui est renvoyée irrégulièrement dans tous les sens, et la *diffusion* est la dénomination sous laquelle on comprend le phénomène de cette réflexion irrégulière. Quant à ce qui reste de la chaleur reçue par le corps, elle pénètre à son intérieur ou est *absorbée*, s'il s'agit d'une substance *athermane;* elle peut être en partie absorbée, en partie *transmise*, si c'est, au contraire, une substance *diathermane.*

D'un corps à l'autre, les proportions de ces diverses quantités de chaleur varient suivant des conditions qui ne dépendent pas seulement de sa nature et de l'état de sa surface, mais aussi, comme nous allons le voir, de la chaleur elle-même qu'il reçoit ainsi, aussi bien sous le rapport de sa température que de la *qualité de ses rayons*, expression que nous aurons bientôt l'occasion d'expliquer et de définir. En représentant par l'unité ou par le nombre 100 (on pose l'une ou l'autre de ces conventions à volonté) la quantité totale de chaleur rayonnante reçue par un corps, on arrive à déterminer expérimentalement

chacune des parties dans lesquelles le faisceau reçu se décompose ; chacun des nombres ainsi obtenus représente un *pouvoir* propre au corps. On a ainsi : 1° le *pouvoir réflecteur* correspondant à la portion de chaleur régulièrement réfléchie ; 2° le *pouvoir diffusif*, pour la chaleur diffusée ; 3° le *pouvoir absorbant*, pour celle qui, pénétrant dans le corps, en élève la température, et enfin 4° le *pouvoir diathermane*, comprenant la chaleur qui le traverse sans l'échauffer.

Dans la définition qu'on vient de donner, il s'agit des pouvoirs *absolus* particuliers à chaque substance, et il est clair que, s'il était possible de mesurer chacun d'eux avec une rigoureuse exactitude, la somme des quatre nombres ainsi obtenus dans les mêmes conditions expérimentales serait précisément égale à 1 ou à 100. Mais on peut aussi considérer chacun de ces pouvoirs comme rapporté à celui d'un corps spécialement choisi, et alors les nombres qu'on obtient mesurent les pouvoirs *relatifs*. Nous aurons soin de distinguer ces deux sortes de déterminations.

Enfin, il y a lieu de considérer la faculté plus ou moins grande que possèdent les corps de rayonner ou d'émettre de la chaleur, lorsque leur température dépasse celle des corps qui les environnent ou de l'enceinte où ils sont renfermés. Mais pour comparer, sous ce rapport, les corps différents, et obtenir ce qu'on nomme leurs *pouvoirs émissifs*, il est nécessaire que les expériences soient faites à une même température et que l'émission de la chaleur se fasse dans les mêmes conditions d'inclinaison ; il faut enfin que la nature ou la qualité de la chaleur rayonnante soit identique. On prend généralement pour unité le pouvoir émissif du noir de fumée, le seul corps dont le pouvoir réflecteur et le pouvoir diffusif puissent être considérés comme nuls.

Ces définitions posées, voyons comment on a procédé à la détermination expérimentale de ces divers pouvoirs. Commençons par le pouvoir émissif.

Les premières recherches sur ce point sont dues à Rumford

et à Leslie, et datent du commencement de ce siècle. Remplissant d'eau chaude un vase métallique suspendu dans une enceinte de température constante, Rumford constatait, à l'aide d'un thermomètre plongé dans le vase, le refroidissement subi par le liquide en une minute de temps. Il recommençait l'expérience en changeant la surface du vase, mais en partant toujours d'un même excès de la température de l'eau sur la température ambiante. C'est ainsi qu'il trouva que le refroidissement était plus rapide quand la surface est noircie, plus lent si elle est métallique, et en général que cette vitesse variait selon la nature ou l'état de la surface. Il en concluait que le pouvoir

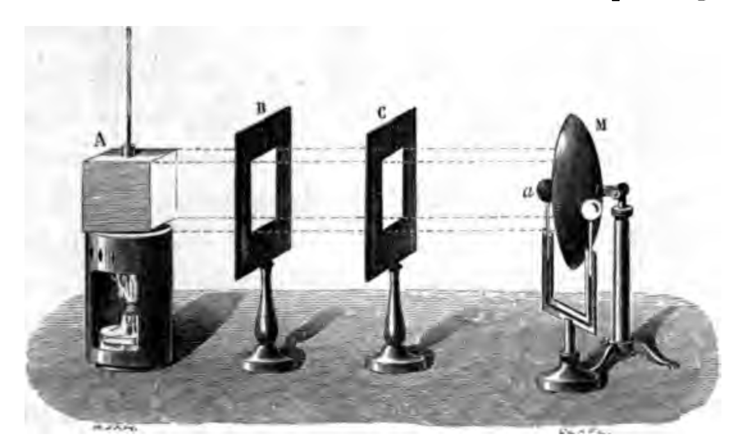


Fig. 140. — Mesure des pouvoirs émissifs. Expériences de Leslie.

émissif change avec cet état; mais les nombres trouvés par Rumford ne pouvaient servir à mesurer le pouvoir émissif, parce que le refroidissement du vase n'était pas dû seulement au rayonnement, mais aussi au contact des couches d'air qui l'entouraient.

Leslie, à la même époque, fit des expériences plus concluantes, à l'aide d'une méthode qui ne mettait en jeu que l'influence du rayonnement. Pour source de chaleur de température constante, il prenait un vase métallique de forme cubique rempli d'eau maintenue à l'état d'ébullition. Les diverses faces du cube étaient formées ou revêtues des diverses substances dont il s'agissait de comparer les pouvoirs émissifs : lames métalliques d'argent, de cuivre, d'étain poli, couches de noir

… ic. A une distance invariable … boules de son thermomètre diffé- … préservée du rayonnement par un … successivement le rayonnement direct … sur la boule du thermomètre. Il notait … température marqués par l'instrument, dès … stationnaire, et, admettant que ces excès … aux intensités de la chaleur reçue par la … faisceau rayonné par chaque face du cube, il en … les pouvoirs émissifs relatifs des corps dont cette … formée.

… obtenir des effets plus marqués, Leslie disposait der- … la boule du thermomètre différentiel un miroir sphérique … poli, dont l'axe principal était normal à la face du … : la boule et la face en question avaient d'ailleurs leurs centres à deux foyers conjugués du miroir. Dans la figure, deux écrans percés d'ouvertures carrées limitent le faisceau rayonnant, ce qui n'est pas d'ailleurs indispensable; en effet, dans chaque expérience, la chaleur rayonnée directement ou par réflexion sur le miroir forme toujours un faisceau conique d'ouverture constante, la même pour toutes les faces, puisque la distance reste invariable.

Leslie trouva ainsi que c'est le noir de fumée qui, toutes choses égales, a le plus grand pouvoir émissif. Venaient ensuite l'eau, le papier à écrire, la cire à cacheter, le verre, l'encre de Chine, et en dernier lieu les métaux, fer, étain, argent, cuivre, or.

Melloni reprit, en se servant de la pile thermo-électrique, la détermination des pouvoirs émissifs[1], mais c'est à MM. de la

1. Voici les nombres trouvés par Leslie, puis par Melloni, pour diverses substances :

D'après Leslie.				D'après Melloni	
Noir de fumée	100	Plombagine	75	Noir de fumée	100
Eau	100	Plomb terne	45	Blanc de céruse	100
Papier à écrire	98	Mercure	20	Colle de poisson	91
Cire à cacheter	95	Plomb brillant	19	Encre de Chine	85
Verre	90	Fer poli	15	Gomme laque	72
Encre de Chine	88	Étain, argent, cuivre et or	12	Métaux	12
Glace	85				
Minium	80				

Provostaye et Desains qu'on doit les recherches les plus étendues sur cette question. Ils se proposèrent de chercher comment varie la loi de l'émission avec la température, mesurèrent le pouvoir émissif à 100° et à des températures supérieures jusqu'à 400°, et enfin étudièrent l'influence de la surface émettante sur la nature de la chaleur émise, comme aussi celle de la direction de l'émission sur son intensité. Nous allons résumer brièvement les résultats obtenus d'après M. P. Desains lui-même[1].

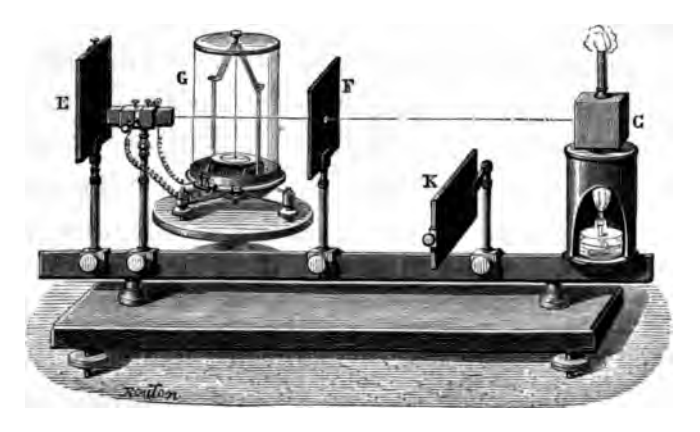


Fig. 141. — Mesure des pouvoirs émissifs à l'aide de l'appareil de Melloni.

« La détermination des pouvoirs émissifs à 100° a complètement changé les idées qu'on se faisait sur la grandeur de ces pouvoirs, au moins dans le cas des métaux. Elle a montré que, vers 100°, le pouvoir émissif de l'argent en lames est compris entre 0,02 et 0,03 ; que celui de l'or est 0,04 ; celui du platine 0,09 ou 0,10, suivant les échantillons ; celui de l'argent déposé au mat par les procédés ordinaires, 0,05. On a constaté aussi que le pouvoir émissif de l'ocre rouge est égal à celui du noir de fumée, et que celui du soufre lavé est environ 0,73.

1. *Rapport sur les progrès de la théorie de la chaleur.* Voici le tableau des pouvoirs émissifs de quelques corps, d'après les expériences de MM. de la Provostaye et Desains :

Noir de fumée	100	Le même longtemps chauffé	2,8
Ocre rouge	100	Argent chimiquement déposé bruni	2,2
Soufre lavé	73	Platine sortant du laminoir	10,6
Argent vierge sortant du laminoir	3,0	Platine bruni	9,2
Argent mat chimiquement déposé	5,3	Or en feuilles	4,3
Argent pur bruni	2,5	Cuivre en lames	5,0

« On avait presque toujours étudié l'émission à des températures voisines de 100°. Dulong et Petit seuls avaient cherché à étendre jusqu'à 300° la comparaison des pouvoirs émissifs du verre et de l'argent, et, des expériences qu'ils avaient faites entre ces limites, ils avaient cru pouvoir conclure que les rapports des pouvoirs émissifs des corps restent constants à toute température. Les expériences de MM. de la Provostaye et P. Desains ont prouvé que cette constance n'existe pas. Pour comparer vers 400° les pouvoirs émissifs des deux corps, ils ont pris pour source de chaleur une cuve de fonte dont une paroi était plane et bien rabotée. Sur l'une des moitiés de cette face, ils placèrent du noir de fumée, et sur l'autre de la substance à éprouver. La cuve était pleine d'alliage constamment brassé, et, en déplaçant la pile parallèlement à elle-même, on pouvait faire rayonner vers elle, soit l'un, soit l'autre des deux enduits dont on voulait comparer les pouvoirs émissifs.

« Au rouge, on prenait pour corps rayonnant une lame de platine, couverte, sur ses deux moitiés, d'enduits différents et portée à l'incandescence par un courant électrique constant.

« En opérant ainsi, on a trouvé qu'au rouge le pouvoir émissif du borate de plomb n'est plus que les 0,75 de l'oxyde de cuivre. Depuis, on a reconnu qu'à cette température le pouvoir émissif de l'oxyde de zinc n'est plus que les 0,60 de celui de l'ocre. Or à 100° ces quatre corps émettent la chaleur dans des proportions absolument égales. Pour le platine, la variation se fait en sens inverse. Au rouge naissant, son pouvoir émissif devient 0,14, tandis qu'il est 0,10 à 100°. »

Les deux mêmes physiciens ont constaté que la chaleur émise par le platine au rouge naissant traverse une lame mince en verre dans la proportion de 0,39 ; celle qu'émet le borate de plomb dans les mêmes conditions ne traverse le même écran que dans la proportion de 0,22. D'où l'on doit conclure que la nature de la surface rayonnante influe sur la qualité de la chaleur émise. Ils ont enfin reconnu que le rapport des pouvoirs émissifs change en général avec la direction

du rayonnement : ainsi le pouvoir émissif du verre est 0,9 du noir de fumée dans la direction normale, tandis qu'il tombe à 0,75 sous l'inclinaison de 70 degrés.

§ 5. RÉFLEXION DE LA CHALEUR. — POUVOIRS RÉFLECTEURS ET POUVOIRS DIFFUSIFS DES CORPS.

La mesure des pouvoirs réflecteurs des corps a été aussi l'objet des expériences de Leslie, qui détermina, non le pouvoir réflecteur absolu, mais le rapport existant entre ce dernier et celui du laiton poli pris pour unité. Il concentrait pour cela, à l'un des foyers conjugués du réflecteur sphérique N (fig. 142), les rayons de chaleur émis par un cube plein d'eau bouillante M

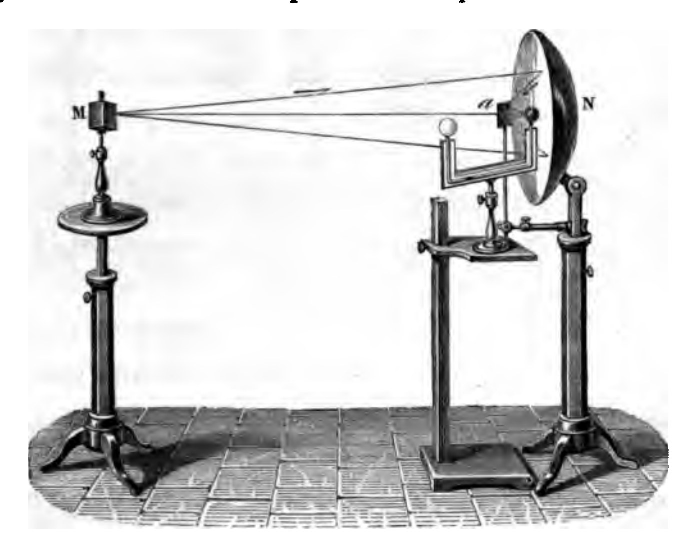


Fig. 142. — Mesure des pouvoirs réflecteurs par la méthode de Leslie.

dont l'une des faces occupe l'autre foyer. Entre le premier foyer et le réflecteur, il disposait une plaque *a* formée du métal dont il voulait étudier le pouvoir. Le faisceau calorifique, réfléchi une première fois par la surface sphérique concave, était renvoyé une seconde fois par la plaque, en un point situé entre celle-ci et le réflecteur, sur l'une des boules du thermomètre différentiel. Leslie notait l'élévation de température marquée

par l'instrument, quand le niveau du liquide était devenu stationnaire. Puis il répétait l'expérience, en changeant à chaque fois la nature de la plaque réfléchissante. Les indications du thermomètre étant proportionnelles aux quantités de chaleur reçues par la boule, et par suite à celles qui avaient été réfléchies par les diverses substances, leur rapport était égal à celui de leurs pouvoirs réflecteurs. Voici les nombres trouvés par Leslie :

Laiton	100	Plomb	60
Argent	90	Étain amalgamé	50
Étain en feuilles	85	Verre	10
Etain plané	80	Verre huilé	5
Acier	70	Noir de fumée	0

La comparaison de ces nombres avec ceux qui donnent les pouvoirs émissifs des mêmes corps, montre que l'ordre dans lequel ces corps sont rangés ici est précisément inverse de celui qu'ils affectent dans le premier tableau : les pouvoirs émissifs sont donc en raison inverse des pouvoirs réflecteurs. Nous verrons plus loin que cette loi est la conséquence naturelle de l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant, du moins dans les corps athermanes.

La pile thermo-électrique de Melloni permet de mesurer les pouvoirs réflecteurs absolus. Voici la disposition qu'ont adoptée, dans ce but, MM. de la Provostaye et Desains.

Sur une règle horizontale en cuivre, solide, bien dressée et portant une division qui permet de mesurer les distances, sont montées sur des supports à coulisse les diverses pièces qu'employait Melloni pour ses recherches sur la chaleur rayonnante. En A est le pied portant la source de chaleur, qui est ici une lampe de Locatelli[1], puis deux écrans B et C, l'un plein, l'autre percé d'une ouverture qui donnera passage au faisceau de chaleur. Le support D porte un cercle divisé en degrés, sur lequel

1. C'est une lampe formée d'un réservoir où l'huile est maintenue à un niveau constant; le bec rectangulaire a une mèche de même forme ; la constance de sa flamme et l'absence d'une cheminée en verre l'ont fait choisir de préférence pour source de chaleur lumineuse. Elle est armée d'un réflecteur parabolique.

on fixe perpendiculairement la plaque réfléchissante, dont le plan passe par le centre du cercle. Le pied du support porte une alidade HH′, mobile autour de la verticale du centre du cercle gradué; c'est sur cette alidade qu'on fixe la pile, dont les faces sont protégées par un écran E contre le rayonnement direct.

Pour mesurer le pouvoir réflecteur d'une substance donnée, on commence par placer l'alidade et la pile dans le prolongement de la règle. On fait agir directement le faisceau de chaleur sur la pile et l'on note la déviation de l'aiguille du galvanomètre. Cette déviation servira à mesurer l'intensité totale du

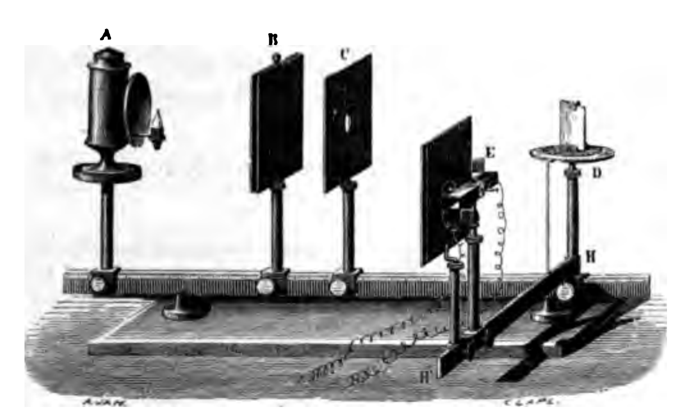


Fig. 143. — Mesure des pouvoirs réflecteurs par l'appareil de Melloni. Expériences de MM. de la Provostaye et P. Desains.

faisceau calorifique direct, à une distance égale à la somme des distances des deux règles. On place alors la lame, ou le miroir de la substance dont on veut mesurer le pouvoir réflecteur, sur le support D; on la dispose de façon qu'elle fasse un angle donné avec le rayon incident. Cela fait, on tourne l'alidade mobile jusqu'à ce que sa direction fasse, avec celle de la règle fixe, le même angle que celle-ci avec la plaque. On abaisse l'écran B : le faisceau de chaleur tombe sur le miroir, s'y réfléchit et vient, après cette réflexion, frapper la face de la pile, produisant une déviation qui, comparée à la première, mesure la fraction de chaleur réfléchie.

En faisant varier l'incidence, puis la nature de la source de

chaleur, MM. de la Provostaye et Desains ont pu reconnaître l'influence qui résulte de ces variations pour la quantité de chaleur réfléchie par une même substance. Voici quelques-uns des résultats obtenus par ces savants physiciens :

Sur 100 rayons émanés d'une lampe de Locatelli, et tombant, sous l'incidence de 50°, sur des miroirs formés de lames polies des métaux usuels, la proportion des rayons réfléchis a été la suivante :

Métaux.	Pouvoirs réflecteurs absolus.	Métaux.	Pouvoirs réflecteurs absolus.
Argent	97	Étain	85
Or	96	Acier	83
Cuivre	93	Zinc	81
Laiton	93	Platine poli	80
Métal des miroirs	86	Fer	77

L'influence de la source est mise en évidence dans le tableau suivant :

Substances des miroirs	Lampe Locatelli.	Chaleur solaire naturelle.	Lampe à l'alcool salé.
Argent	97	92	»
Or	96	87	»
Métal des miroirs	86	64	»
Acier	83	60	88
Platine	80	60	86
Laiton	93	»	95

On voit que, pour une même substance, le pouvoir réflecteur diminue quand la température de la source de chaleur s'élève, ou quand diminue, dans la source, le nombre des rayons calorifiques qui abondent dans l'émission des corps à basse température. D'une manière plus générale, l'intensité de la réflexion diminue à mesure qu'augmente le degré de réfrangibilité. C'est ce que les savants expérimentateurs ont reconnu en employant les rayons solaires simplifiés par leur dispersion à travers des prismes de verre. Étendant les mêmes mesures aux rayons obscurs moins réfrangibles que le rouge, ils ont vu que, sur tous les métaux essayés, ces rayons obscurs se réfléchissent en proportion plus considérable que la chaleur lumineuse. Le pou-

voir réflecteur de l'acier, qui est 60 seulement pour la chaleur solaire naturelle, atteint 75 pour 100 quand ce métal réfléchit la chaleur qui provient d'une bande du spectre obscur, symétrique du bleu par rapport au rouge extrême. Cette influence de la nature des rayons sur l'intensité de la réflexion est plus marquée encore pour le verre et les substances analogues. Le verre ne réfléchit que 4 pour 100 des rayons solaires sous l'incidence normale; la proportion atteint 10 pour la chaleur émanée de lames noircies portées à la température de 300°.

L'influence de l'inclinaison sur l'intensité de la réflexion de la chaleur n'est pas moins bien établie. Citons, d'après M. Desains, les nombres suivants, relatifs au pouvoir réflecteur du verre, pour la chaleur émanée de sources à 150° et 200° :

Incidences.	30°	45°	70°	75°
Pouvoir réflecteur.	10	11	25	32

Dans toutes les expériences que nous venons de passer en revue, il ne s'agit que de la réflexion régulière, de celle qui s'effectue à la surface des corps polis en suivant la loi de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion. Mais les surfaces mates et dépolies ne possèdent pas de pouvoir réflecteur régulier appréciable. Les unes, comme le noir de fumée[1], absorbent à peu près toute la chaleur qui leur est envoyée ; d'autres n'en absorbent qu'une partie et diffusent le reste, c'est-à-dire disséminent les rayons de chaleur non absorbés tout autour du point d'incidence. La quantité de chaleur diffusée varie suivant la nature de la chaleur rayonnante émise; ce fait a été constaté par J. Herschel, puis par Melloni. Plus tard, Knoblauch a étudié la diffusion d'un faisceau calorifique complexe. « MM. de

1. Les premières observations sur l'inégalité du pouvoir réflecteur selon l'état des surfaces sont dues à Scheele. « Ayant exposé un miroir concave métallique et poli en face de l'ouverture d'un poêle dans lequel le bois brûlait avec activité, cet illustre chimiste observa que ce miroir réfléchissait toute la chaleur qui arrivait sur sa surface, puisqu'il n'y avait pas d'échauffement sensible. Si l'on enduisait la surface de noir de fumée, le miroir s'échauffait au point qu'on ne pouvait plus tenir impunément la main sur la partie convexe. » (Despretz.)

la Provostaye et Desains étudièrent la question à un autre point de vue. Ils ont cherché à définir les lois de la distribution de la chaleur diffusée et à mesurer l'intensité totale de la diffusion. Parmi les résultats qu'ils ont obtenus, nous citerons les suivants :

« 1° Lorsque la chaleur rencontre sous une direction normale des corps tout à fait mats, tels que la céruse, le chromate de plomb, elle est diffusée suivant une loi qu'on peut énoncer comme il suit :

« Si, sur une sphère ayant son centre au milieu de la tache lumineuse formée par les rayons incidents, on découpe des éléments égaux, chacun de ces éléments reçoit des quantités de chaleur diffusée respectivement proportionnelles aux cosinus de l'angle que forme avec la normale l'axe du faisceau qui le recouvre. »

« Une sommation donne alors la quantité totale renvoyée par diffusion, et, par suite, la quantité absorbée. En opérant avec la chaleur solaire naturelle, on trouve que, sur la céruse, il y a 82 rayons diffusés sur 100, et, par suite, 18 rayons absorbés ; sur le chromate, 66 rayons diffusés et 34 absorbés.

« 2° Jusqu'à de très fortes inclinaisons, on trouve le maximum de diffusion dans la direction de la normale, et non dans celle que l'on appelle ordinairement la direction de la réflexion régulière.

« 3° Pour le platine platiné et l'argent en poudre, les lois de la diffusion sont tout autres que pour la céruse[1]. »

§ 6. POUVOIR ABSORBANT DES CORPS. — ÉGALITÉ DU POUVOIR ABSORBANT ET DU POUVOIR ÉMISSIF.

Pour déterminer le pouvoir absorbant, Melloni employait son appareil, qu'il disposait de la manière suivante (fig. 144). Au devant de la pile thermo-électrique et à une courte distance, il

1. *Rapport sur les progrès de la théorie de la chaleur*, par P. Desains.

plaçait un disque de cuivre très mince, dont la surface était recouverte de la substance à étudier, la face postérieure étant elle-même recouverte de noir de fumée. Le faisceau calorifique rayonnant tombait sur le disque et la chaleur absorbée s'échappait de l'autre côté en rayonnant vers la pile, dont les indications montraient les pouvoirs absorbants relatifs des substances soumises à l'expérience.

Leslie avait fait des expériences dans le même but, en se servant du réflecteur de l'appareil représenté dans la figure 142. Le cube d'eau bouillante étant placé à une certaine distance du réflecteur, il mettait au foyer conjugué l'une des boules

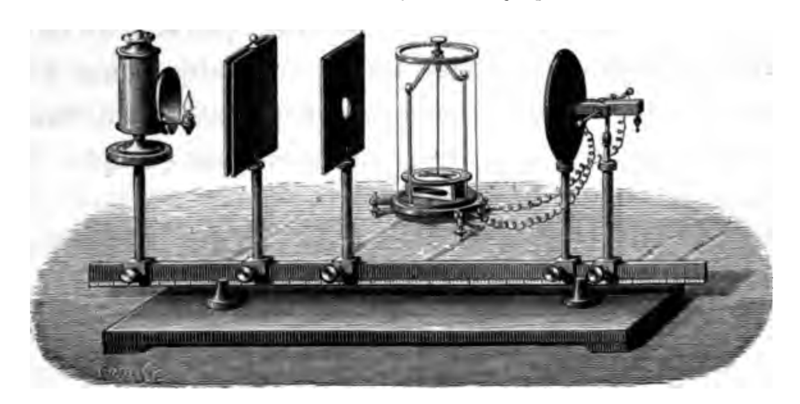


Fig. 144. — Mesure du pouvoir absorbant à l'aide de l'appareil de Melloni.

de son thermomètre différentiel, qu'il recouvrait successivement des substances dont il s'agissait de trouver les pouvoirs absorbants relatifs : noir de fumée, blanc de céruse, feuilles d'or, d'argent, de cuivre, etc. Leslie supposait que les excès de température marqués par son thermomètre dans les diverses expériences étaient proportionnels aux pouvoirs absorbants. Or cette hypothèse, déduite de la loi de Newton sur le refroidissement, n'est pas applicable dans ce cas, parce que la loi en question suppose que le corps qui s'échauffe ou se refroidit conserve la même surface ou ne change pas de nature, tandis que l'enveloppe de la boule du thermomètre différentiel variait au contraire d'un cas à l'autre dans les expériences de Leslie.

Quand il s'agit de substances athermanes bien polies, à peu

près complètement dépourvues de pouvoir diffusif, on peut admettre que toute la chaleur qu'ils reçoivent par voie de rayonnement est, ou bien réfléchie régulièrement, ou bien absorbée. Dès lors, si l'on connaît les pouvoirs réflecteurs absolus de ces substances, en les retranchant de l'unité ou de 100, la différence sera la mesure de leur pouvoir absorbant. S'il s'agit au contraire de corps mats, et que la température de la source soit très élevée, toute la chaleur reçue sera diffusée ou absorbée. Si l'on a calculé, comme on l'a vu plus haut, le pouvoir diffusif, on le retranchera pareillement de l'unité ou de 100, et la différence sera la mesure du pouvoir absorbant du corps. C'est en opérant ainsi que MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé les pouvoirs absorbants de diverses substances pour la chaleur émanée de sources différentes sous une incidence voisine de la normale. Voici quelques nombres tirés de leurs expériences :

	Pouvoirs absorbants.		
Verre et métaux polis.	Chaleur solaire.	Lampe Locatelli.	Lampe modérateur.
Verre.	96,5	»	95,5
Acier.	42	17,5	34
Métal des miroirs..	34	14,5	30
Platine..	39	17	30
Or..	13	4,5	»
Argent plaqué.	8	2,5	3,5
Corps mats.			
Céruse..	18	»	»
Chromate de plomb. . . .	34	»	»
Poudre d'argent.	24	»	»

Les mêmes savants ont donné une méthode directe pour déterminer le pouvoir absorbant d'un corps quelconque, ou tout au moins le rapport des pouvoirs absorbants de deux substances. Prenant un thermomètre très sensible, ils recouvraient la boule des substances à étudier, l'exposaient dans chaque cas et de la même manière au rayonnement d'une source constante, notaient les excès stationnaires de température et prenaient le rapport, non de ces excès, mais des vitesses de

refroidissement qui leur correspondent. En opérant ainsi, ils ont trouvé 19 pour la céruse. C'est, comme on voit, sensiblement le résultat obtenu en prenant le complément du pouvoir diffusif du même corps.

Les pouvoirs absorbants des corps et leurs pouvoirs émissifs varient dans le même sens et dans la même proportion. Cela résulte à la fois de l'expérience et de la théorie des échanges de température connue sous la dénomination d'*équilibre mobile de température*, et que nous allons essayer de résumer en quelques lignes.

Quand un nombre quelconque de corps, ayant la même température, sont enfermés dans une enceinte dont les parois ont aussi une température uniforme égale à la première, on admet que cette température commune reste constante, que la quantité de chaleur ne varie point ou qu'il y a équilibre de température entre les corps et l'enceinte. On peut expliquer cet état d'équilibre de deux manières différentes. La première consiste à supposer qu'il n'y a pas de rayonnement réciproque des corps et des parois de l'enceinte entre eux, qu'il n'y a aucun échange de chaleur, et que l'équilibre est la conséquence de cette absence de tout rayonnement et de toute absorption. Mais on peut aussi admettre que l'enceinte et les corps ne cessent de rayonner les uns vers les autres, échangeant entre eux des rayons ou faisceaux de chaleur d'égale intensité, chaque corps émettant précisément autant de chaleur qu'il en reçoit. Cette seconde explication, généralement admise, a été conçue et développée par un physicien génevois, P. Prevost; elle suppose qu'il y a égalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un même corps. Quand les corps en présence et les parois de l'enceinte ont des températures inégales, les plus chauds rayonnent plus de chaleur qu'ils n'en reçoivent et se refroidissent; les autres, au contraire, s'échauffent en absorbant plus de chaleur qu'ils n'en émettent. Il résulte de cet échange une égalisation progressive des températures et, en définitive, quand l'équilibre est établi, une température uni-

forme, qui se maintient, comme nous venons de le dire, par un échange continu de chaleur.

On peut encore présenter d'une autre façon la nécessité de l'égalité des pouvoirs absorbant et émissif d'un même corps. Quand un faisceau de chaleur rayonnante tombe en un point de la surface, une fraction est réfléchie régulièrement, une autre fraction est diffusée, et le reste est absorbé. Si, en même temps, un faisceau tend à sortir de la surface au même point, une fraction est réfléchie et une autre diffusée intérieurement, et c'est la différence qui est réellement émise. Si i et i' sont les intensités des deux faisceaux, r, r', d et d' les pouvoirs réflecteurs et diffusifs du corps considéré, on aura $q=i\,(1-r-d)$ pour la quantité de chaleur absorbée, et $q'=i'\,(1-r'-d')$ pour la quantité émise. En rapportant à l'unité les divers pouvoirs de ces deux expressions, il est clair que le rapport du pouvoir absorbant au pouvoir émissif sera celui des quantités $1-r-d$ et $1-r'-d'$[1]. Or il est aisé de comprendre que les causes qui font varier les pouvoirs réflecteur et diffusif extérieurs font varier de la même manière les mêmes pouvoirs intérieurs. Il y a donc proportionnalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un même corps, et égalité entre eux si on les rapporte à la même unité, au pouvoir émissif et au pouvoir absorbant du noir de fumée par exemple. L'expérience confirme l'exactitude de ce raisonnement, qui d'ailleurs suppose que les deux faisceaux calorifiques sont de même nature. MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé, par exemple, que le pouvoir réflecteur du verre, pour la chaleur venue de lames noircies à 150° ou 200°, a pour valeurs : 10, 11, 25, 32, sous les incidences de 30°, 45°, 70°, 75°; et comme le verre n'a pas de pouvoir diffusif appréciable, il en résulte que les pouvoirs absorbants de ce corps, pour la chaleur émanée de semblables sources, sont respectivement égaux à 90, 89, 75, 68. Or ce sont précisément là les valeurs trouvées pour les

1. S'il s'agit de corps polis sans pouvoir diffusif, d et d' sont nuls; c'est r et r' qui le sont, dans le cas de corps mats n'ayant pas de pouvoir réflecteur régulier appréciable.

pouvoirs émissifs du verre sous les mêmes inclinaisons. Empruntons encore aux mêmes physiciens un autre exemple. Les pouvoirs émissifs, vers 100°, des métaux polis, argent, or, platine, sont 2,5, 3,5 et 10,5. Leurs pouvoirs réflecteurs pour la chaleur émanée de sources noircies à basses températures sont égaux à 98, 96 et 90, c'est-à-dire sont complémentaires des pouvoirs émissifs. Ceux-ci sont donc bien égaux aux pouvoirs absorbants des mêmes corps.

On doit à Ritchie une expérience qui permet de vérifier l'égalité des deux pouvoirs dans le cas de la chaleur obscure. Il substituait aux deux boules du thermomètre différentiel de Leslie deux réservoirs cylindriques B, C, entre lesquels il plaçait un cylindre A rempli d'eau chaude (fig. 145). Les faces en regard des cylindres étaient couvertes, l'une d'une feuille de métal brillant, l'autre de noir de fumée. Le cylindre A, mobile sur une coulisse, pouvait être à volonté approché ou éloigné de B et de C. Or l'expérience montrait que, s'il était placé à égale distance des deux autres, les colonnes liquides du thermomètre restaient au même niveau et en équilibre. Les deux cylindres B et C absorbaient donc la même quantité de chaleur. En appelant e, e' les pouvoirs émissifs des faces du cylindre A, a et a' les pouvoirs absorbants des faces de B et de C tournées vers la source, il est évident que les chaleurs absorbées sont proportionnelles aux produits $e'a$ et ea'. Comme on a $e'a = ea'$ d'après l'expérience, si l'on prend pour unités des pouvoirs absorbant et émissif a' et e', qui sont ceux du noir de fumée, il en résultera $a = e$.

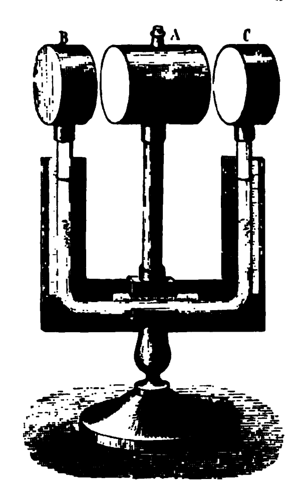


Fig. 145. — Expérience de Ritchie démontrant l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant.

Pour terminer ce paragraphe, disons quelques mots de l'influence des couleurs des corps sur leur pouvoir absorbant, et sur quelques expériences récentes qui s'y rattachent.

L'influence de la couleur sur l'absorption des radiations calorifiques avait été mise en évidence par des expériences de Franklin. Cet illustre physicien, posant sur la neige des morceaux d'étoffes de diverses couleurs, les laissa un certain temps exposés à la chaleur solaire. Ces fragments, en absorbant les rayons de chaleur, s'échauffèrent, fondirent la neige au-dessous d'eux, et s'enfoncèrent ainsi à des profondeurs diverses, d'autant plus grandes que leur couleur était plus foncée. On avait cru pouvoir conclure de ce résultat que les corps de couleurs claires sont les plus mauvais absorbants, et les corps de couleurs noires ou foncées les meilleurs absorbants, et cela justifiait une fois de plus l'identité supposée des rayons de lumière et des rayons de chaleur. Mais Tyndall a fait voir récemment que cette conclusion n'est pas entièrement rigoureuse. Il faut, suivant ce physicien, tenir compte de la nature de la source de chaleur, les rayons de chaleur obscure ne se comportant pas de la même façon que les rayons de chaleur lumineuse. Il faut aussi mettre en ligne de compte le pouvoir diathermane des substances. C'est ainsi qu'ayant saupoudré deux cartes, l'une de poudre blanche d'alun, l'autre de poudre noire d'iode, et les ayant exposées au feu l'une et l'autre, il trouva que la carte iodée s'échauffait à peine, tandis que la carte alunée était devenue extrêmement chaude : il explique cette différence par la propriété diathermique que l'iode possède à un haut degré ; la chaleur rayonnante pénètre dans la poudre et se réfléchit sur les surfaces limites des molécules, sans être absorbée par elles. C'est ainsi encore qu'un fragment de phosphore amorphe, presque noir, placé au foyer de la lumière électrique, ne put s'enflammer, tandis que le même foyer portait presque instantanément le platine à la chaleur blanche. Tyndall attribue cet effet curieux à la diathermanéité du phosphore.

Cette dernière propriété, que possèdent certaines substances, d'être traversées par les rayons de chaleur sans les absorber, ou, ce qui revient au même, sans que leur température en soit élevée, nous amène à la question de la propagation de la cha-

leur rayonnante à travers les corps et à la mesure de ce que Melloni a nommé le pouvoir diathermane.

§ 7. DÉTERMINATION DU POUVOIR DIATHERMANE DES CORPS. — RÉFRACTION DE LA CHALEUR.

Cette propriété est la plus prononcée possible dans le sel gemme. Sur 1000 rayons qui arrivent à la surface d'une lame de cette substance, 923 sont transmis; les 77 rayons qui ne passent point sont réfléchis sur les deux faces de la lame; par conséquent, aucun d'eux n'est absorbé. Ce résultat remarquable, découvert par Melloni, reste le même quelle que soit la nature des rayons de chaleur, qu'il s'agisse de chaleur lumineuse ou de chaleur obscure.

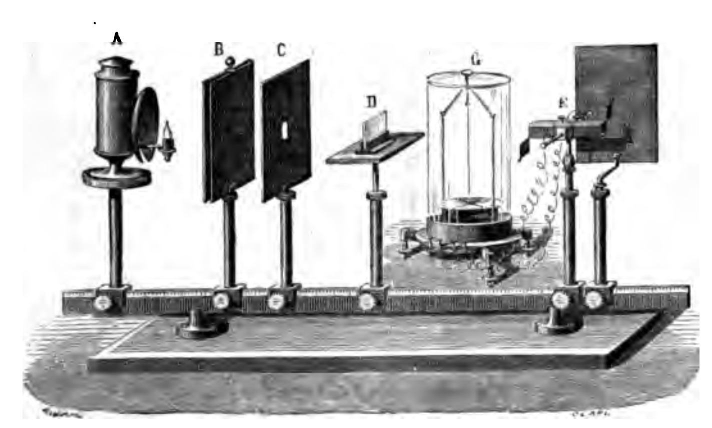


Fig. 146. — Appareil de Melloni pour la mesure du pouvoir diathermane des corps.

L'alun, le verre ne sont diathermanes que pour les radiations de chaleur lumineuse; ils arrêtent les rayons de chaleur obscure : il en est de même du spath d'Islande, du cristal de roche, de la glace. L'épaisseur des lames a une influence sur l'absorption, comme sur la transmission des rayons de chaleur; mais cette influence ne croît pas proportionnellement avec l'épaisseur. Ainsi sur 100 rayons qui arrivent sur deux lames diathermanes, dont l'une a une épaisseur double de l'autre, 62 rayons passent dans la plus mince, 58 dans l'autre : une

lame dont l'épaisseur est quadruple de la première, laisse passer 55 rayons.

La comparaison des pouvoirs diathermanes des corps se fait à l'aide de l'appareil de Melloni, disposé comme le montre la figure 146. On voit en D, sur un support, la plaque de la substance dont il s'agit de mesurer le pouvoir diathermane. La pile thermo-électrique est disposée en E, dans la direction du faisceau de chaleur qui traverse l'ouverture pratiquée dans l'écran C. On commence par mesurer la déviation de l'aiguille du galvanomètre, produite par le faisceau direct, sans interposition de la plaque. Puis, cette dernière étant placée sur son

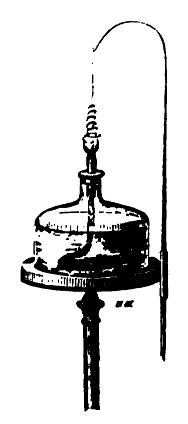



Fig. 147. — Hélice de platine incandescente.



Fig. 148. — Cube d'eau bouillante.

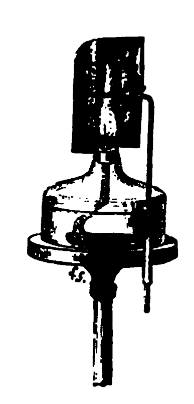


Fig. 149. — Plaque de cuivre noircie chauffée à 400°.

support, on note la déviation produite par le même faisceau traversant la plaque. Le rapport de ces deux déviations donne le pouvoir diathermane de la substance. Pour étudier l'influence de la nature de la source, il suffit de substituer à la lampe de Locatelli d'autres sources de chaleur, par exemple un cube d'eau bouillante, une plaque de cuivre noircie, une hélice de platine incandescente : ces diverses sources calorifiques sont représentées dans les figures 147, 148 et 149. Dans les expériences qu'il fit à ce sujet, Melloni avait soin, pour rendre les résultats comparables, de placer ces diverses sources à des distances de la pile telles, que le faisceau direct produisît sur l'aiguille du galvanomètre les mêmes déviations.

Voici quelques nombres, qui prouvent l'influence de la nature de la source de chaleur sur la transmission ou sur le pouvoir diathermane de diverses substances :

	Lampe de Locatelli	Cube d'eau à 100°	Cuivre à 400°	Platine incandescent
Rayonnement direct. . . .	100	100	100	100
Sel gemme incolore. . . .	92	92	92	92
Spath d'Islande.	39	28	6	0
Verre à glace.	39	24	6	0
Cristal de roche incolore. .	38	28	6	0
Cristal de roche enfumé. .	37	28	6	0
Alun.	9	2	0	0
Glace très pure.	6	0	0	0
Sulfate de chaux.	14	5	0	0

On a conclu de ces expériences que, comme il y a divers rayons de lumière, il y a divers rayons de chaleur, que les corps absorbent et transmettent en diverses proportions, à peu près de la même façon que les corps transparents absorbent de préférence, ou laissent passer, telles ou telles couleurs. C'est pour exprimer cette propriété que Melloni a employé le mot de *thermochroïsme*, formé de deux mots dont le premier signifie *chaleur* et le second *coloration*. Avant de donner, sur cette partie importante de la théorie de la chaleur rayonnante, un résumé des principaux phénomènes qui la constituent, entrons dans quelques détails sur une propriété qui est commune aussi à la lumière et à la chaleur : nous voulons parler de la déviation que subissent les rayons calorifiques en changeant de milieu.

Les rayons de chaleur qui pénètrent dans un milieu diathermane, y subissent en effet le changement de direction que nous avons étudié, en traitant de la lumière, sous le nom de *réfraction*. Si le faisceau calorifique tombe perpendiculairement à la surface du milieu, la déviation est nulle. Mais, pour toute autre incidence, le faisceau est dévié : il se rapproche de la normale au point d'incidence, en passant d'un milieu dans un autre milieu d'une plus grande densité En un mot, les lois de la réfraction de la chaleur s'énoncent comme celles de la réfraction de la lumière. C'est un fait qu'on démontre expérimentalement

en se servant de lentilles sphériques convergentes, pour concentrer les rayons calorifiques qui accompagnent les rayons lumineux du soleil. On trouve que c'est au foyer, là où la lumière est la plus intense, que la chaleur est aussi la plus forte, et chacun peut vérifier l'exactitude de ce fait, en allumant à l'aide d'une loupe une substance tant soit peu inflammable aux rayons du soleil : de l'amadou, du drap, du bois, du papier, etc. (fig. 150). Il s'agit là, il est vrai, de sources de chaleur lumineuse; mais Melloni a démontré, en employant des prismes et des lentilles de sel gemme — cette substance est,



Fig. 150. — Réfraction de la chaleur.

de toutes, celle qui absorbe le moins de chaleur — que la chaleur obscure se réfracte de la même manière que celle provenant des sources incandescentes.

La réfraction de la chaleur a été utilisée, comme la réflexion, pour produire par la concentration des rayons calorifiques du soleil une chaleur très intense : on donne le nom de *verre ardent* à toute lentille construite dans ce but avec une substance diathermane quelconque. La puissance d'un verre ardent est d'autant plus considérable que son ouverture est plus grande, et que les rayons des sphères auxquelles appartiennent les surfaces de la lentille ont une plus grande longueur. Tschirnhausen, célèbre par la construction de miroirs

ardents d'une grande puissance, fit faire aussi des verres de près d'un mètre de diamètre, à l'aide desquels il parvint à fondre des métaux, à vitrifier des matières minérales. Buffon obtint les mêmes résultats avec une lentille à échelons : on a vu que c'est un verre dont l'une des surfaces est plane, l'autre étant taillée en couronnes concentriques. La courbure de chacune de ces couronnes est calculée de telle sorte que les rayons solaires tombant sur la surface viennent tous se concentrer en un même point (fig. 151). Dans un appareil de ce genre, l'épaisseur du verre étant beaucoup moindre que dans une lentille ordinaire de même ouverture, il y a moins de chaleur absorbée, et l'effet calorifique au foyer commun est plus intense.

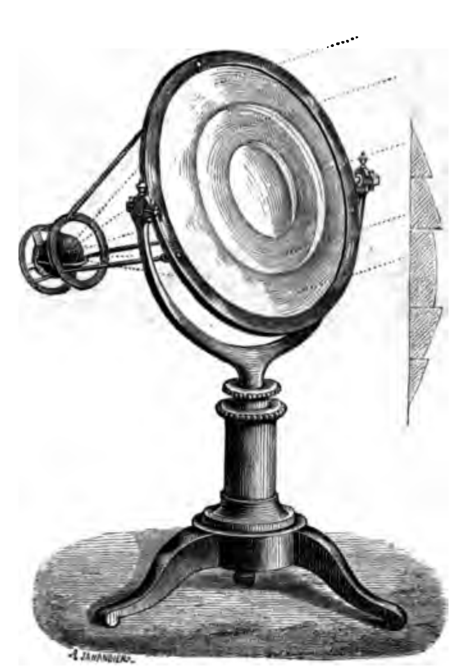


Fig. 151. — Lentille à échelons.

On a imaginé aussi de construire des verres ardents avec divers liquides; la lentille était formée par deux verres convexes laissant entre eux une cavité, et l'on remplissait celle-ci du liquide qu'on voulait employer. On cite dans ce genre le verre ardent construit au siècle dernier par Bernières et Trudaine : il avait 4 pieds ($1^m,33$) de diamètre, et 8 pieds de rayon de courbure. En le remplissant d'essence de térébenthine et l'exposant aux rayons solaires, on obtint des effets calorifiques d'une intensité extraordinaire.

Tout le monde a entendu raconter que les marins, dans leurs voyages aux régions glacées des pôles, ont pu se servir de lentilles de glace pour se procurer du feu. En Angleterre,

on a fait avec une lentille de glace d'un très grand diamètre (3 mètres) des expériences très intéressantes, qui ont prouvé



Fig. 152. — Expérience du verre ardent de Bernières.

la possibilité d'enflammer de la poudre, du papier, au foyer de cette lentille d'un nouveau genre.

§ 8. ANALYSE DES RADIATIONS CALORIFIQUES. — THERMOCHROSE.

Nous avons vu, en étudiant les radiations solaires, qu'outre leur propriété d'être lumineuses, c'est-à-dire d'affecter la rétine en provoquant la double sensation de la lumière et de la couleur, elles jouissent aussi de deux autres propriétés, celle d'émettre de la chaleur et d'exercer une action chimique. Bien plus, nous savons qu'indépendamment des rayons qui composent le spectre lumineux, la radiation solaire comprend toute une série de rayons moins réfrangibles, dont l'ensemble forme un spectre obscur et calorifique ayant une étendue non moindre que celle du spectre lumineux. Une troisième série de rayons plus réfrangibles constitue enfin la partie exclusivement chi-

mique de cette radiation. Analysées de la même manière par le prisme, les autres sources lumineuses présentent une constitution analogue, tout en se distinguant les unes des autres par l'étendue de leurs spectres, par l'intensité relative des radiations de divers ordres, enfin par les lacunes que l'observation y a constatées. Nous ne voulons ici nous occuper que de ce qui est relatif aux radiations calorifiques, et nous commencerons par rappeler, en le complétant, ce qui en a été dit dans le second volume du MONDE PHYSIQUE.

Une des premières questions que les physiciens se soient posées en présence du spectre solaire, est celle de la distribution de la chaleur en ses diverses parties. On crut d'abord, assez naturellement, que les intensités des rayons colorés étaient également réparties au point de vue de la lumière et au point de vue de la chaleur, et les premières expériences, dues à Landriani, à Rochon et à Sennebier parurent confirmer cette manière de voir : c'est dans le jaune, c'est-à-dire dans la partie du spectre la plus éclatante, qu'ils constatèrent l'existence du maximum de température. En 1800, W. Herschel découvrit l'existence de rayons calorifiques obscurs, de réfrangibilité moindre que ceux de l'extrême rouge ; et c'est parmi eux, près de la limite inférieure du spectre, qu'il trouva le maximum de température. Ces expériences, répétées par Malus et Bérard en présence de Berthollet, confirmèrent la découverte de l'illustre astronome, mais différèrent des siennes en ce qui regarde la position du maximum, qu'ils trouvèrent à la limite même du rouge, et non dans la partie obscure du spectre. D'autres observateurs, Leslie, Ritter, Davy, etc., entreprirent les mêmes recherches, sans trouver plus que leurs prédécesseurs de résultats concordants. C'est alors que Seebeck (1828) fit voir que les diverses déterminations du maximum de température étaient également vraies, les divergences provenant de la nature du prisme employé pour la décomposition des rayons solaires. Ayant étudié en effet la marche comparative du thermomètre sur des spectres fournis par des prismes différents,

d'eau, d'acide sulfurique, d'alcool, de crown-glass et de flint-glass, ce physicien observa que la position du maximum était sur le jaune pour le prisme d'eau, comme l'avaient trouvé Rochon et Sennebier, sur l'orangé pour l'alcool et l'acide sulfurique, à l'extrême rouge dans la position indiquée par Malus et Bérard avec un prisme en crown-glass ou en certaines espèces de flint-glass, tandis qu'en employant le flint-glass anglais, ce maximum était dans la zone marquée par les expériences d'Herschel.

Les expériences de Melloni (1832) achevèrent la démonstration de Seebeck et mirent en évidence l'action absorbante inégale des divers milieux sur les divers rayons qui composent la chaleur solaire. L'éminent physicien se demanda « pourquoi des substances incolores, ne produisant aucune variation dans les intensités relatives des rayons lumineux, donnent de si grandes différences à l'égard de la chaleur. Voilà précisément, dit-il[1], la question que je tâchai de résoudre, il y a une douzaine d'années, par une série d'expériences dont les premiers résultats furent communiqués à l'Académie par l'entremise de M. Arago, et imprimés ensuite dans les *Annales de Chimie et de Physique* de Paris pour l'année 1832. Ayant pris les températures des principales bandes colorées d'un spectre fourni par un prisme de crown-glass, et vérifié que le *maximum* de température y était à l'extrémité du rouge, je continuai à explorer, au moyen du thermo-multiplicateur rectiligne, la distribution de la chaleur au delà de cette extrémité, et je notai les six bandes inférieures de chaleur obscure isothermes aux six couleurs supérieures du spectre ; puis j'interposai une couche d'eau de $0^m,004$ d'épaisseur renfermée entre deux lames parallèles de verre, de manière que les rayons émergents du prisme fussent transmis au travers de cette couche dans une direction qui ne s'écartait pas beaucoup de la perpendiculaire, et je mesurai de nouveau les températures des bandes obscures et lumineuses. Je les trouvai tellement alté-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1844, t. I.

rées, que quelques-unes avaient été totalement détruites; d'autres s'étaient affaiblies d'une quantité plus ou moins grande; on en trouvait enfin qui n'avaient subi qu'une diminution à peine appréciable. La zone qui avait éprouvé la destruction totale était la moins réfrangible, c'est-à-dire la bande isotherme du violet; de là la perte devenait de moins en moins prononcée à mesure que l'on approchait de la bande rouge : elle diminuait encore sur le rouge, l'orangé et une partie du jaune; après quoi les rapports des températures initiales se conservaient à peu près constants jusqu'à la limite violette supérieure.

« Cette action inégale exercée par l'eau sur les diverses bandes du spectre devait évidemment déplacer le maximum de température et le faire marcher vers les rayons plus réfractés, puisque les bandes les moins réfrangibles, que nous appelons, pour abréger, *bandes inférieures*, éprouvaient une perte beaucoup plus forte que les bandes les plus réfrangibles ou supérieures : c'est aussi ce qui advint, car le maximum de chaleur passa de la dernière limite du rouge à la partie supérieure de l'orangé. Cette expérience prouvait incontestablement que *la chaleur répandue dans les différentes parties du spectre solaire n'est pas un agent homogène*[1]. »

Melloni démontra que cette hétérogénéité n'était pas spéciale à la radiation calorifique solaire, qu'elle existait également

1. Voici un tableau donnant les résultats fournis par cette remarquable expérience :

Bandes calorifiques du spectre solaire.	Déviations du thermo-multiplicateur au sortir du prisme de crown.	Déviations du thermo-multiplicateur après l'interposition de l'eau	Pertes en centièmes du faisceau initial
Violet.	2	2	0,00
Indigo	5	4,5	0,10
Bleu	9	8	0,11
Vert	12	10	0,17
Jaune	25	20	0,20
Orangé	29	21	0,27
Rouge	32	20	0,37
1re bande obscure	29	14	0,52
2e — —	25	9	0,64
3e — —	12	3	0,75
4e — —	9	1	0,88
5e — —	5	0,5	0,90
6e — —	2	0,0	1,00

dans les flux de chaleur provenant des sources terrestres lumineuses ou obscures, que ces sources en un mot étaient composées d'éléments calorifiques divers, tantôt coexistants, tantôt séparés, et tout à fait analogues aux rayons colorés dont se compose la lumière. Transmis avec une égale abondance par des couches très minces de corps diaphanes, eau, verre, alcool, ces éléments traversaient, en proportions très différentes, les couches épaisses de ces mêmes corps ; en outre, des quantités égales de chaleur, prises au sortir des couches de diverse nature passaient en quantité si différente par une lame donnée d'une substance diaphane incolore, que certains rayons étaient entièrement transmis, d'autres complètement absorbés[1]. D'autre part, on a vu que Melloni avait mis en complète évidence le fait si remarquable d'une substance diaphane incolore, le sel gemme, transmettant avec la même facilité toutes sortes de rayons calorifiques, les rayons obscurs comme les rayons lumineux. La conséquence est ainsi formulée par Melloni :

« En combinant, dit-il, ces données avec la notion de la transmission constante du sel gemme pour toutes sortes de rayonnements, directs ou modifiés, pendant leur passage au travers des milieux diathermiques, je crus pouvoir en conclure hardiment que le verre, l'eau, le cristal de roche et généralement tous les corps diaphanes et incolores, étaient thermochroïques, c'est-à-dire qu'ils agissaient sur les rayons calori-

1. Le tableau suivant montre quelles modifications l'interposition d'une lame diathermane fait subir à des faisceaux calorifiques dont l'intensité commune est 100, au sortir d'écrans diathermanes de même épaisseur (2mm,6), mais de substances différentes. Les deux lames d'alun et de chaux sulfatée ont la même épaisseur, 2mm,6, celle de verre noir 1mm,8 :

Écrans diathermanes.	Nombre des rayons transmis par une lame		
	d'alun.	de chaux sulfatée.	de verre noir.
Sel gemme	92	92	92
Spath d'Islande	91	89	55
Cristal de roche	91	85	54
Fluorure de calcium	90	91	91
Verre	90	85	55
Alun	90	47	0,5
Sulfate de chaux	59	54	15
Tourmaline verte	18	1	30
Verre noir	0,5	48	52

fiques comme le font les milieux colorés sur la lumière. Alors la question de la distribution des températures dans le spectre solaire se présenta sous son véritable point de vue. On trouverait certainement absurde le procédé de celui qui voudrait comparer les intensités relatives des éléments lumineux séparés par les différences de réfraction d'un prisme de verre fortement coloré en bleu par l'oxyde de cobalt, ou doué de toute autre coloration énergique. C'était tout juste l'œuvre qu'on avait accomplie jusqu'alors en étudiant la distribution de la chaleur sur les spectres donnés par les prismes ordinaires de crown-glass, de flint, d'eau, d'alcool et d'autres substances incolores. Pour avoir les véritables températures des zones prismatiques, lumineuses ou obscures, il fallait évidemment décomposer le rayon solaire avec le prisme de sel gemme, qui, étant également perméable à toute espèce de radiation calorifique, constituait, pour ne pas sortir de notre comparaison, le verre blanc de la chaleur. »

Il y a donc une coloration calorifique, comme il y a une coloration lumineuse ; de là le nom de *thermochrose* donné par Melloni aux phénomènes de cet ordre, et celui de *thermochroïque* donné à un corps qui, diaphane ou incolore pour les radiations lumineuses, absorbe même sous une faible épaisseur une proportion notable d'un faisceau de chaleur solaire naturelle, et transmet le reste du faisceau dans un état de composition toute différente de celle qui le caractérisait avant l'incidence. Une substance diaphane incolore joue seule, comme Melloni le dit avec justesse, le rôle du *verre blanc pour la chaleur*, ou est *leucothermique* : c'est le sel gemme[1].

Il résulte de là que, si l'on représente par une courbe l'intensité de la chaleur des diverses parties du spectre solaire, dans toute son étendue chimique, lumineuse et calorifique,

1. Melloni admettait que la proportion de 0,925 que le sel gemme bien par transmet, quelle que soit la longueur d'onde des rayons, reste la même quelle que soit l'épaisseur ; les 0,077 de perte seraient dus aux réflexions de la chaleur sur les deux faces ; mais les recherches de MM. de la Provostaye et P. Desains ont montré qu'il y a réellement une partie de ces rayons absorbée et que cette absorption est plus forte pour la chaleur obscure.

cette courbe variera selon la nature de la substance composant le prisme qui a servi à obtenir le spectre, ou, ce qui revient au même, on aura autant de courbes d'intensité que de substances diathermanes; mais chacune d'elles ne représentera que l'intensité des radiations non absorbées. Seule, la courbe relative au sel gemme donnera la représentation vraie, au moins proportionnelle, de la radiation calorifique totale.

La figure 153 représente cette dernière courbe d'après les expériences de Franz et de Muller. Elle donne aussi celle qu'on obtient avec un prisme de crown. Se confondant d'ailleurs dans toute l'étendue du spectre lumineux, ces deux courbes vont en s'élevant d'une manière continue, depuis un point de la partie

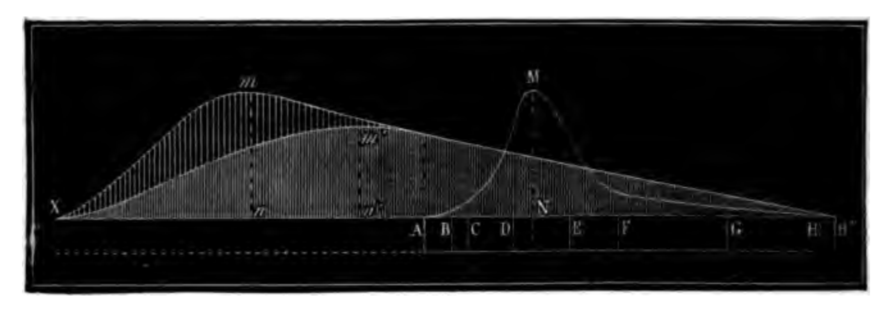


Fig. 153. — Courbes des intensités calorifiques de la radiation solaire. X*m*H', courbe obtenue avec un prisme de sel gemme; X*m*'H', courbe obtenue avec un prisme de crown: A*m*H, courbe des intensités lumineuses.

ultra-violette jusqu'à l'extrême rouge. Au delà, l'intensité calorifique reste encore la même pour les deux spectres, à peu près jusqu'au maximum relatif au crown. Le véritable maximum *mn* du spectre calorifique du sel gemme se trouve à une distance de la limite rouge extrême égale à celle qui sépare cette limite du bleu vert. Plus loin la chaleur va en décroissant jusqu'en X, où elle est nulle, de sorte que la longueur de la partie obscure est à peu de chose près aussi grande que celle de tout le spectre lumineux.

Cette proportion entre les deux parties, visible et obscure, de la radiation solaire ne serait probablement plus la même si l'analyse de la lumière du soleil pouvait s'effectuer en dehors de l'atmosphère. Il résulte en effet des recherches qui ont été

faites sur l'absorption des rayons calorifiques par les gaz et les vapeurs, que les pouvoirs absorbants des gaz transparents, nuls pour les radiations lumineuses, sont relativement considérables pour les radiations obscures. Tyndall a fait sur ce sujet des expériences nombreuses. Il se servait, dans ce but, d'un tube horizontal dont les ouvertures étaient fermées par des plaques de sel gemme; le vide étant fait dans le tube, il y introduisait successivement les gaz dont il voulait comparer les pouvoirs absorbants. A égale distance des deux faces d'une pile thermo-électrique, deux sources calorifiques obscures de même puissance (du cuivre chauffé à 400°, c'est-à-dire au-dessous du rouge) rayonnaient sans produire de déviation dans l'aiguille du galvanomètre, tant que les intensités des faisceaux calorifiques restaient égales. Aussitôt que le tube renfermant le gaz était interposé sur la route de l'un des faisceaux, l'équilibre se trouvait rompu, et la déviation indiquait quelle avait été l'absorption de la chaleur par la colonne gazeuse. En prenant pour unité la chaleur absorbée par l'air atmosphérique sous la pression ambiante, voici quelques nombres trouvés par Tyndall pour l'absorption relative de quelques gaz à la pression de 25 millimètres de mercure :

Air	1	Acide carbonique	972
Oxygène	1	Protoxyde d'azote	1590
Azote	1	Hydrogène sulfuré	2100
Hydrogène	1	Ammoniaque	5460
Oxyde de carbone	750	Acide sulfureux	6480

Comme on le voit, les gaz simples ont un faible pouvoir absorbant, égal pour tous; les gaz composés ont au contraire un pouvoir absorbant considérable, et qui semble croître à mesure qu'ils sont rapprochés de leur point de liquéfaction. Il en est de même des vapeurs. Les parfums répandus dans l'air absorbent[1] aussi les radiations obscures. D'après Tyndall,

1. Tyndall décrit ainsi les expériences qui lui ont servi à déterminer l'influence absorbante de diverses odeurs : « Voici, dit-il, un certain nombre de petits carrés égaux de papier buvard, que je roule en petits cylindres dont chacun a 5 centimètres de longueur. J'humecte les cylindres en les plongeant par une de leurs extrémités dans une huile aromatique ; l'huile

le pouvoir absorbant de la vapeur d'eau dépasse de beaucoup celui de l'air qui la contient : l'air saturé d'humidité aurait, à la pression d'une atmosphère, une action absorbante presque égale à cent fois celle de l'air sec. M. Magnus (de Berlin) a contesté l'exactitude des conclusions du physicien anglais : selon lui, l'air humide n'aurait pas un pouvoir absorbant plus grand que celui de l'air sec ; ce n'est pas l'eau à l'état de vapeur, mais bien à l'état vésiculaire comme elle se présente dans les nuages ou dans les brouillards, qui causerait l'absorption mesurée par Tyndall. Mais quelle que soit la cause de cette absorption, elle n'en existe pas moins et doit dès lors jouer dans l'atmosphère un grand rôle. Nous reviendrons donc sur les conséquences à tirer du fait pour l'explication de divers phénomènes de météorologie.

La distribution de la chaleur dans les spectres varie, comme on doit s'y attendre, avec la nature de la source, c'est-à-dire avec la proportion des rayons de diverses réfrangibilités qu'elle contient. Tyndall a donné un exemple de cette différence en traçant la courbe de distribution relative au spectre de l'arc voltaïque obtenu avec un prisme de sel gemme : l'arc était lui-même produit par une pile de cinquante éléments de Grove, et rendu constant à l'aide d'un régulateur Foucault construit par M. Duboscq. La figure 154 représente cette courbe, qui est la moyenne d'un grand nombre de déterminations effectuées à l'aide de la pile thermo-électrique. Comme dans les courbes de

pénètre dans le papier en vertu de l'attraction capillaire, et le cylindre tout entier en est maintenant imprégné. J'introduis le papier ainsi roulé et humecté dans un tube de verre, d'un diamètre tel, que le cylindre le remplisse sans être pressé ; puis, entre mon appareil dessiccateur et le tube à expérience, je place le tube contenant le papier aromatisé. Le vide est fait actuellement dans le tube à expérience, et l'aiguille est à zéro ; en ouvrant ce robinet, je fais passer doucement de l'air sec à travers les plis du papier saturé. Cet air sec se charge du parfum de l'huile aromatique, et l'entraine dans le tube à expérience. Nous savons que l'absorption d'une atmosphère d'air sec prise pour unité produit une déviation de 1 degré ; donc toute absorption additionnelle ou plus grande que l'unité révélée par l'expérience sera due à l'odeur dont l'air est accompagné. » Voici quelques-uns des résultats :

Patchouli	30	Thym	68
Essence de girofle	34	Camomille	87
Essence de rose	37	Casse	109
Lavande	60	Grande lavande	355
Citron	65	Anisette	372

la figure 151, les ordonnées qui marquent les intensités relatives du rayonnement calorifique sont proportionnelles aux déviations observées. Voici les remarques de Tyndall à ce sujet :

« L'espace XMOA, dit-il, représente le rayonnement invisible. On voit ici que l'intensité du pouvoir thermique augmente graduellement de l'extrémité bleue à l'extrémité rouge du spectre, et que, dans la région des rayons obscurs au delà du rouge, la courbe s'élevant subitement, forme un pic escarpé et massif, qui par sa grandeur fait paraître très chétive la partie de la

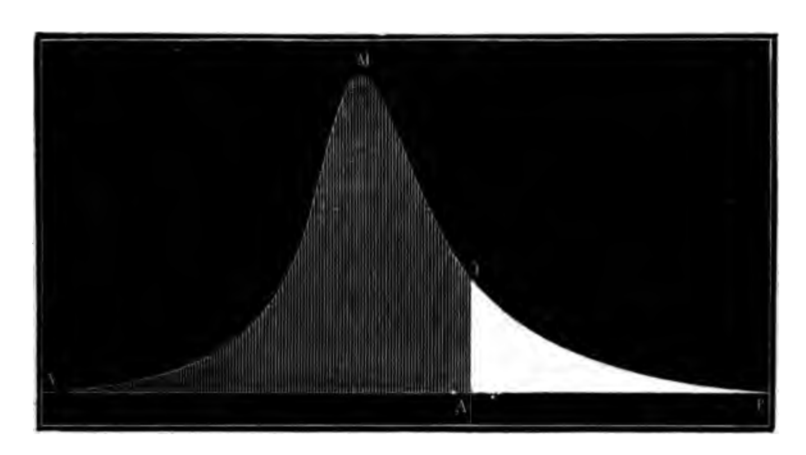


Fig. 154. — Courbe de l'intensité calorifique des radiations obscures et des radiations lumineuses de l'arc voltaïque, d'après Tyndall.

figure qui représente la radiation visible. Les rayons du soleil, avant d'arriver à la terre, ont à traverser l'atmosphère où ils rencontrent la vapeur aqueuse atmosphérique, qui exerce une puissante absorption sur les rayons de chaleur invisibles. Il doit résulter de là, indépendamment de toute autre considération, que le rapport du rayonnement invisible au rayonnement visible, dans le cas du soleil, doit être bien moindre que dans le cas de la lumière électrique. Nous voyons que l'expérience confirme cette conclusion ; car, tandis que la figure 151 nous montre le rayonnement invisible du soleil à peu près double du rayonnement visible, la figure 152 nous montre le rayonnement invisible de la lumère électrique près de huit fois aussi

grand que le rayonnement visible. Si l'on fait passer le faisceau de lumière électrique à travers une couche d'eau d'une épaisseur convenable, on met son rayonnement à peu près dans les mêmes conditions que celui du soleil; et en décomposant le faisceau ainsi tamisé, on obtient une distribution de la chaleur très semblable à celle qu'on observe dans le spectre solaire. »

« J'ai fait, ajoute le physicien anglais, un grand nombre d'expériences pour reconnaître s'il y avait quelque solution de continuité dans le spectre calorifique; mais toutes les mesures prises jusqu'ici, sur des sources artificielles, révèlent un accroissement graduel et continu de la chaleur, du point où elle commence à être sensible jusqu'au point maximum. Sir John Herschel a démontré que cela n'avait pas lieu dans le rayonnement du soleil, quand on l'analyse avec un prisme de flint-glass. En faisant tomber le spectre solaire sur une feuille de papier noirci, sur laquelle on avait répandu de l'alcool, cet éminent physicien a déterminé le pouvoir échauffant du spectre par son pouvoir vaporisant ou desséchant. Il a trouvé que la surface mouillée formait, en se séchant, une série de taches représentant des maxima thermiques, séparés les uns des autres par des espaces d'une intensité calorifique comparativement faible. On n'a pas observé de maxima et de minima semblables dans le spectre de la lumière électrique, ni dans celui d'un fil de platine chauffé à blanc par un courant voltaïque[1]. »

Les lacunes trouvées par Herchel dans le spectre solaire sont dues, très probablement, à l'absorption élective qu'exercent les couches de notre atmosphère, et aussi peut-être celles de l'atmosphère solaire sur les radiations calorifiques de la photosphère. La même question a été reprise récemment par un astronome américain, S. Langley : nous y reviendrons plus loin en traitant de l'énergie de la radiation solaire.

1. *Calorescence*, mémoire lu à la Société royale de Londres en mars 1865.

CHAPITRE XIII

PROPAGATION DE LA CHALEUR — CONDUCTIBILITÉ

§ 1. CONDUCTIBILITÉ DES CORPS SOLIDES HOMOGÈNES.

Nous avons vu que, si l'on tient à la main une barre de fer dont l'extrémité est plongée dans un foyer incandescent, la chaleur du foyer se communique au métal, et se propage de molécule à molécule tout le long de la barre ; après un temps assez court, la température s'élève au point de brûler la main et de la forcer à lâcher prise. Si, au lieu d'être en fer, la barre, tout en conservant le même diamètre et la même longueur, était d'un autre métal, on observerait un effet analogue ; mais on verrait varier à la fois, et le temps qu'un point situé à une même distance de l'extrémité chauffée sur chaque barre mettrait à s'élever à une certaine température, et la distance du point le plus éloigné de chacune d'elles susceptible d'acquérir une température déterminée. Voici une expérience fort simple qui mettra en évidence la différence que nous signalons :

Prenons deux barres de dimensions égales, l'une en cuivre, l'autre en fer. Des billes de bois sont fixées avec de la cire à des distances égales des extrémités. Plaçons les barres bout à bout, et chauffons les extrémités contiguës, au-dessous du point de jonction, au moyen de la flamme d'une lampe à esprit de vin. Nous allons voir les billes tomber les unes après les autres, à mesure que la cire est fondue par la chaleur qui se propage par voie de conductibilité dans chaque barre. Mais au

bout d'un temps donné nous trouverons que le nombre des billes tombées est plus grand du côté de la barre de cuivre que du côté de la barre de fer. D'autre part, deux billes de même rang, situées par conséquent à la même distance de la source, ne tombent pas au même instant. Laissons de côté pour le moment la rapidité avec laquelle la chaleur s'est propagée le long de chaque barre, pour ne nous occuper que du premier effet, c'est-à-dire de la distance à laquelle un certain degré de température, qui est ici celui de la fusion de la cire, a pu être atteint sur les deux métaux. Le cuivre, pour lequel cette distance s'est trouvée plus grande, est dit ***meilleur conducteur*** de la chaleur que le fer.

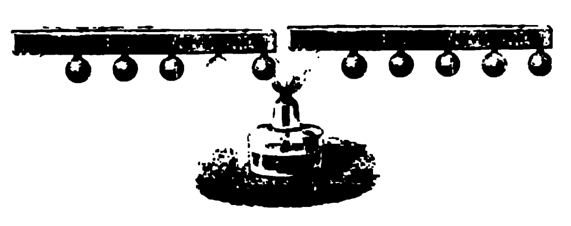


Fig. 155. — Inégales conductibilités du cuivre et du fer.

La figure 156 représente un appareil, inventé par Ingenhouz et modifié par Gay-Lussac, qui sert à comparer entre eux les pouvoirs conducteurs des corps solides. Des baguettes cylindriques de chacune des substances à comparer, enduites de couches de cire ayant la même épaisseur, sont placées horizontalement, de manière à plonger par une de leurs extrémités dans un bain d'huile ou d'eau bouillante, l'autre extrémité traversant les parois de la caisse qui contient l'huile. La chaleur du liquide est conduite le long de chaque baguette, et fond la cire à des distances d'autant plus grandes, que la conductibilité de la substance dont elle est [illegible] est elle-même plus considérable.

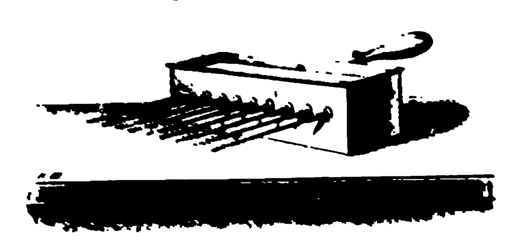


Fig. 156. — [illegible]

Fourier, dans sa *Théorie* [illegible] a cherché à déter-

miner, par l'analyse mathématique, la loi de propagation de la chaleur par voie de conductibilité dans les solides homogènes. S'appuyant sur ce fait d'expérience, que la chaleur émise par un tel corps provient, non seulement des molécules superficielles, mais aussi de celles qui sont situées au-dessous de la surface, à une certaine profondeur, il admet que les particules intérieures sont autant de centres rayonnants qui envoient de la chaleur dans tous les sens. Deux particules quelconques, suffisamment voisines, échangent ainsi des rayons de chaleur, et la plus froide gagne par cet échange une certaine quantité de chaleur qui, toutes choses égales, doit être proportionnelle à l'excès des deux températures. C'est ce qu'on nomme l'hypothèse du *rayonnement particulaire*. Cette hypothèse peut-elle rendre compte de la façon dont la chaleur se propage à l'intérieur des corps athermanes, ou par voie de conductibilité? C'est ce que le savant géomètre a cherché à montrer en soumettant la question au calcul. Il l'a fait d'abord pour le cas d'un mur solide, compris entre deux plans parallèles indéfinis, dont les deux faces sont maintenues par des sources constantes à des températures inégales; quand l'équilibre sera établi entre les températures des diverses couches, quand elles seront toutes traversées par la même quantité de chaleur dans le même temps, on appellera *coefficient de conductibilité* du corps cette quantité de chaleur ramenée à l'unité de temps, à l'unité de surface et à l'unité d'épaisseur. Partant de la loi qui régit ce cas général, Fourier a formulé celle de la propagation dans une barre rectangulaire indéfinie, puis dans une barre de longueur finie, qui seule permet des vérifications expérimentales. Nous allons indiquer, en citant les expériences de Despretz, quelle est cette loi.

Voici comment procédait ce physicien. Les barres de divers métaux qu'il employait avaient une section carrée de 21 millimètres de côté. A des distances égales de 10 centimètres étaient creusées des cavités de 6 millimètres de diamètre et de 14 millimètres de profondeur, qu'on remplissait de mercure et

à l'intérieur desquelles étaient plongés les réservoirs d'autant de thermomètres très sensibles. L'une des extrémités de la barre en expérience était chauffée par le moyen d'un quinquet. Un thermomètre très sensible indiquait la température de l'air ambiant. Au bout de quelques heures, les températures marquées par les thermomètres devenaient stationnaires, et l'on notait celle de chacun d'eux. Cela posé, voici comment Despretz vérifiait la loi. Prenons les résultats donnés par une barre de cuivre. La température de l'air extérieur étant 17°,08, les nombres suivants sont ceux des températures des thermomètres devenus stationnaires :

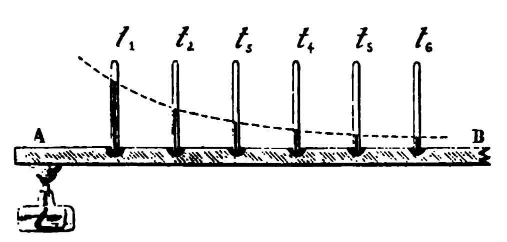


Fig. 157. — Mesure de la conductibilité d'une barre. Expérience de Despretz.

	Températures.	Excès sur l'air.	
1er thermomètre.	83°,44	66°,36	2,14
2e —	63°,36	46°,28	2,15
3e —	49°,90	32°,62	2,11
4e —	41°,40	24°,32	2,17
5e —	35°,71	18°,63	
6e —	33°,26	16°,18	

« La distance entre deux thermomètres consécutifs étant de 10 centimètres, leurs distances au foyer de chaleur sont en progression arithmétique; les excès de leur température sur celle de l'air forment une série géométrique, car *le quotient de deux termes consécutifs est constant*, comme on le voit dans la troisième colonne du tableau $\frac{66,36}{46,28} = 1,4$; $\frac{46,28}{32,62} = 1,4$; $\frac{32,62}{24,32} = 1,4$; et ainsi de suite. *Le quotient de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire est également constant*, comme le montre la quatrième colonne : 2,14 est le quotient de 66,36 + 32,62 par l'excès intermédiaire 46,28 ; 2,15 est le quotient de 46,28 + 24,32 par 32,62, et ainsi de suite. »

En opérant sur des barres de divers métaux, qu'il recouvrait d'un vernis pour égaliser les pertes par rayonnement, Despretz en a conclu les rapports des coefficients de conductibilité. Voici ses résultats :

Or	1000	Étain	303,9
Platine	981	Plomb	179,6
Argent	973	Marbre	23,6
Cuivre	898,2	Porcelaine	12,2
Fer	374,3	Terre des fourneaux	11,4
Zinc	363,0		

Depuis, MM. Wiedemann et Franz ont fait des recherches sur le même sujet. Les barres, de 6 millimètres de diamètre et de 50 centimètres de longueur, étaient argentées et polies. La température de leurs divers points était prise à l'aide de la pile thermo-électrique, pour éviter l'altération produite par les cavités dans la conductibilité des barres, dont le mercure rompait l'homogénéité. Les nombres trouvés par ces savants sont les suivants :

Argent	1000	Fer	119
Cuivre	776	Acier	116
Or	532	Plomb	85
Laiton	236	Platine	84
Zinc	190	Palladium	63
Étain	145	Bismuth	18

Il est à remarquer que les nombres qui servent de mesure aux conductibilités calorifiques des métaux sont presque les mêmes que ceux à l'aide desquels s'expriment leurs conductibilités électriques.

Les métaux sont, de tous les corps solides, les meilleurs conducteurs de la chaleur, si l'on excepte toutefois le bismuth. La pierre, le verre, le marbre, la porcelaine, les oxydes, les terres le sont beaucoup moins que les métaux; enfin le bois, le charbon de bois préparé à une basse température, c'est-à-dire non calciné, et en général les substances organiques, les fruits charnus, les plantes grasses, les tissus des animaux et des végétaux, sont de mauvais conducteurs. « Le bois, dit

Despretz, est un conducteur tellement imparfait, que, dans une expérience où je voulais en comparer la propriété conductrice à celle du fer, j'ai brûlé une barre de chêne à une de ses extrémités, sans pouvoir l'échauffer à quelques pouces de distance. » On voit d'ailleurs, par les nombres qui précèdent, quelle différence existe entre les conductibilités des différents métaux. « On peut mettre cette différence en évidence, dit Tyndall, d'une manière très simple, en plongeant par un bout deux cuillers, l'une de maillechort et l'autre d'argent, dans le même vase d'eau chaude. Après un peu de temps, on trouvera l'extrémité libre de la cuiller d'argent bien plus chaude que celle de sa voisine ; et si l'on place deux morceaux de phosphore sur les manches des deux cuillers, celui qui sera sur l'argent se fondra et s'enflammera dans un temps très court, tandis que la chaleur transmise à travers l'autre cuiller n'arrivera jamais à une intensité suffisante pour enflammer le phosphore. » La raison de ces faits se trouve dans l'inégalité du pouvoir conducteur de l'argent et de celui du maillechort. Tandis que le premier est 1000, le second n'est que 60.

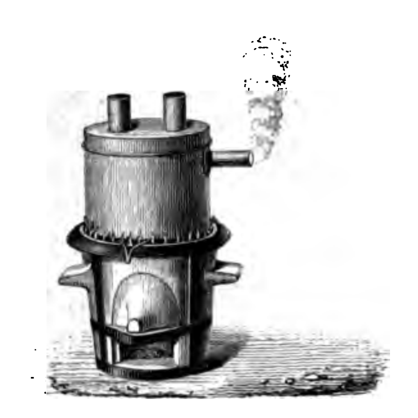


Fig. 158. — Expérience sur la conductibilité du fer comparée à celle du bismuth.

Un dernier fait va nous prouver que la conductibilité d'une substance ne dépend pas de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle la chaleur se propage à son intérieur. On prend deux courts cylindres de même volume, l'un de fer, l'autre de bismuth ; et, après avoir enduit de cire blanche les bases des deux cylindres, on les place tous deux sur le couvercle d'un vase rempli d'eau chaude, les bases recouvertes de cire étant situées en haut. La chaleur du vase va se propager dans chaque cylindre, et la cire arrivera à fondre sur tous les deux; mais c'est sur le bismuth que la fusion commence d'abord.

Cependant la conductibilité du bismuth, d'après notre précédent tableau, est six fois moindre que celle du fer. Quelle est donc la raison du phénomène constaté? C'est que, pour élever un même poids des deux métaux à la même température, il faut quatre fois plus de chaleur environ pour le fer que pour le bismuth. La chaleur reçue par le fer est donc en grande partie employée à élever sa température; et c'est ce qui explique la lenteur relative avec laquelle a lieu la propagation dans sa masse. Pour comparer les pouvoirs conducteurs du fer et du bismuth, il faut prendre deux barres de même diamètre, mesurer les distances à la source de chaleur des tranches qui ont la même température au moment de l'équilibre, et faire les carrés des nombres qui mesurent ces distances : ce sont ces carrés qui serviront de mesure aux deux pouvoirs conducteurs.

§ 2. CONDUCTIBILITÉ DES CORPS CRISTALLISÉS.

Dans tout ce que nous venons de dire, il s'agit de corps homogènes. Dans les solides dont la structure n'est pas identique dans tous les sens, — tels sont par exemple les cristaux biréfringents, le spath, le quartz, etc., — la conductibilité varie suivant le sens de la propagation de la chaleur : il y a une complète analogie entre la manière dont la chaleur se propage dans ces corps, et celle relative au mouvement de la lumière. Ainsi, qu'on prenne deux plaques de quartz taillées, l'une parallèlement, l'autre perpendiculairement à l'axe optique, et qu'on les recouvre toutes deux d'une mince couche de cire vierge; si, après les avoir percées d'un trou, on y fait passer un fil qu'on échauffe par un courant électrique, la cire se fond tout autour du point où la chaleur est appliquée. Mais, tandis que la couche limitant la cire fondue est une ellipse dans la première plaque, c'est un cercle parfait dans la seconde (fig. 159), ce qui démontre l'inégale conductibilité du quartz dans les deux sens.

C'est à de Senarmont qu'on doit les premières recherches approfondies sur la conductibilité de la chaleur dans les cristaux et le procédé d'observation que nous venons de décrire, sauf le mode de suspension et d'échauffement de la plaque. Ce savant physicien plaçait la plaque cristalline sur la pointe d'un tube d'argent effilé en cône, et faisait passer dans le tube un courant d'air chaud qui échauffait ainsi le cristal par son centre. « La fusion de la cire, dit-il, représentait graphiquement la marche de la chaleur, et dessinait, à chaque instant, sur la plaque, la forme d'une courbe isotherme. » Après s'être assuré qu'avec des lames homogènes de verre ou de métal ces courbes étaient circulaires, de Senarmont opéra sur des plaques de quartz ou de spath calcaire taillées normalement à l'axe de symétrie, ce qui lui donna encore, comme on l'a dit plus haut, des courbes circulaires, puis sur des plaques parallèles à cet axe, auquel cas les courbes présentaient une ellipticité prononcée, le plus grand diamètre de l'ellipse étant toujours dirigé suivant l'axe de symétrie.

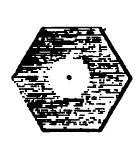



Fig. 159. — Inégale conductibilité du quartz dans des directions différentes.

En appliquant cette méthode à des cristaux de divers systèmes, de Senarmont a formulé des lois qui montrent qu'il y a une identité complète entre le mode de propagation de la chaleur et celui de la lumière dans les corps cristallisés[1].

1. Voici, d'après l'auteur, un résumé de ces lois : 1° Dans les cristaux du système régulier, la conductibilité est égale en tous sens, et les surfaces isothermes sont des sphères concentriques à la source de chaleur, comme dans les milieux homogènes; 2° dans les cristaux du système prismatique droit à base carrée, la conductibilité prend une valeur maximum ou minimum parallèlement à l'axe de figure; les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes de révolution allongés ou aplatis ; dans les systèmes de cristaux se rapportant au prisme rectangulaire droit, la conductibilité prend trois valeurs principales suivant des directions parallèles aux arêtes du prisme ; les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à trois axes inégaux concentriques à la source de chaleur ; 4° dans les cristaux qui se rapportent au prisme rectangulaire à base oblique, les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à trois axes inégaux dont un seul a une position déterminable à priori, celle de l'arête du prisme perpendiculaire aux deux autres. Voir, pour plus de détails, le mémoire de Senarmont dans les *Annales de chimie et de physique* (3° série, t. XXI et XXII), ou les *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1847.

Depuis l'époque (1847) où de Senarmont publia le résultat de ses travaux, M. Jannetaz a étendu le même genre d'études à un plus grand nombre de cristaux, en perfectionnant le procédé décrit plus haut, et en employant une seconde méthode qui permet d'éviter le perçage de la plaque cristalline. Outre la confirmation des lois trouvées par son éminent prédécesseur, et l'obtention de nombreuses mesures des axes des ellipses isothermes, M. Jannetaz est parvenu à établir une relation intéressante entre les lignes de conductibilité maxima et minima et les clivages des cristaux. Par exemple, dans les cristaux à un axe, l'axe de plus grande conductibilité est parallèle au clivage le plus facile[1].

Les végétaux offrent, comme les cristaux, des différences de conductibilité calorifique, selon le sens dans lequel se fait la propagation, et il est vraisemblable que la cause de ces différences a une certaine analogie avec celle dont il vient d'être question, c'est-à-dire provient du défaut d'homogénéité de ces substances. On doit les premières recherches sur ce sujet à deux savants génevois, de Candolle et de la Rive, qui ont étudié la conductibilité de diverses essences de bois, soit dans le sens des fibres végétales, soit dans un sens perpendiculaire. En général, le pouvoir conducteur est plus faible dans ce dernier sens que dans le premier, et dans le chêne le rapport est de 3 à 5. La différence paraît plus prononcée dans les bois tendres que dans les bois durs. Tyndall a étudié la même question en comparant la conductibilité dans trois directions différentes, parallèlement aux fibres, dans un sens perpendiculaire aux fibres et aux couches ligneuses à la fois, et enfin dans une troisième direction, perpendiculaire aux fibres, mais parallèle ou plutôt tangente aux couches. Les résultats auxquels ce savant est parvenu confirment ceux qu'avaient constatés de Candolle et de la Rive : la conductibilité du bois est la plus grande dans la direction des fibres. Elle est aussi plus grande dans le sens

1. Voir les *Comptes rendus pour* 1872, t. II.

perpendiculaire aux couches ligneuses que dans le sens parallèle. Il faut ajouter que la méthode adoptée par Tyndall ne donne pas la conductibilité même, mais seulement la vitesse de transmission de la chaleur, et nous avons vu plus haut qu'il y avait lieu de ne pas confondre ces deux propriétés. Le physicien anglais a trouvé en outre que cette vitesse de transmission est encore moindre dans l'écorce que dans le bois lui-même, et, considérant sans doute les résultats obtenus par lui comme pouvant s'appliquer aux pouvoirs conducteurs, il en conclut que l'écorce des arbres est un fourreau protecteur qui permet au végétal de résister également et à la soustraction soudaine de la chaleur intérieure et à l'invasion subite de la chaleur extérieure. Déjà de la Rive et de Candolle avaient fait remarquer que le faible pouvoir conducteur du bois dans la direction latérale, est favorable à la conservation de la chaleur que l'arbre reçoit du sol, et nous ajouterons que cette influence heureuse doit être encore accrue par la circulation de la sève, puisque les liquides, comme nous allons le voir, conduisent fort imparfaitement la chaleur.

L'inégale conductibilité des différents solides est utilisée dans une foule d'applications. Les outils et les ustensiles en métal, dont l'usage nécessite qu'on les soumette à une haute température, sont munis de manches mauvais conducteurs, en bois par exemple, qui arrêtent presque complètement la propagation de la chaleur. Les tissus de coton, de soie, surtout de laine, sont de fort mauvais conducteurs : ils sont donc très propres à préserver le corps des excès de la chaleur et du froid. En été, ils empêchent la chaleur extérieure de pénétrer jusqu'à la surface de notre corps ; et en hiver, c'est au contraire la chaleur du corps qui reste emprisonnée, par la difficulté qu'opposent les vêtements à sa propagation au dehors. Du reste, ce n'est pas la substance seule dont ils sont composés qui donne aux tissus cette propriété précieuse, c'est aussi leur structure : entre les filaments se trouvent interposées des couches d'air qui restent immobiles, et, comme les gaz en repos, ainsi que

nous le verrons bientôt, conduisent très mal la chaleur, il en résulte que celle-ci passe avec une grande difficulté à travers le tissu. Un édredon conserve la chaleur à un très haut degré, beaucoup mieux que ne ferait une couverture de laine serrée et plus pesante.

On pourrait multiplier à l'infini ces exemples. Bornons-nous à deux ou trois expériences curieuses, fondées sur la différence de conductibilité des corps solides On enveloppe une boule métallique d'une toile fine, qu'on maintient très serrée contre le métal, de façon que le contact soit bien établi. Puis, prenant avec une pince un charbon incandescent, on le pose sur la boule ainsi enveloppée. Le tissu reste intact : on a beau souffler sur le charbon pour augmenter son incandescence, la toile ne brûle pas. C'est que la chaleur reçue par la toile est immédiatement accaparée par le métal très bon conducteur, et disséminée dans sa masse.

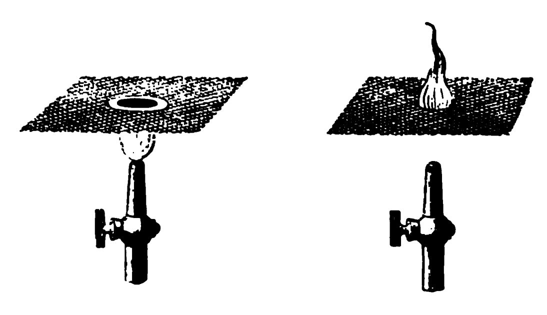


Fig. 160. — Propriété des toiles métalliques ; obstacle qu'elles opposent à la propagation de la chaleur.

Qu'avant d'allumer un bec de gaz, on place au-dessus de l'orifice une toile métallique à tissu un peu serré, et qu'on ouvre le robinet, le gaz se répandra au-dessous et au-dessus de la toile. Si on l'allume au-dessous, la combustion reste limitée à la partie inférieure du jet de gaz ; si au contraire on l'allume au-dessus, c'est la partie supérieure du jet qui brûlera (fig. 160). Dans les deux cas, l'interposition de la toile métallique suffira pour limiter la combustion. La raison de ce fait est simple. Les mailles de la toile forment un excellent conducteur de la chaleur développée. Celle-ci se répand rapidement sur le tissu, sans pouvoir se propager du côté opposé à celui qui est en ignition. Nous verrons une importante application de cette propriété des toiles métalliques

dans les *lampes de sûreté* de Davy, employées par les mineurs. Le tissu métallique qui enveloppe la lumière suffit pour prévenir l'inflammation et l'explosion du grisou, ce gaz si dangereux qui se dégage dans les mines de houille.

L'asbeste et l'amiante sont deux substances minérales soyeuses, célèbres par leur incombustibilité : ce sont en effet des corps très mauvais conducteurs de la chaleur, et l'on peut, avec un gant d'amiante, soutenir dans la main un boulet rouge sans être brûlé. Dans ce cas, la chaleur ne peut se propager : elle est interceptée ; dans l'exemple qui précède elle est, au contraire, absorbée rapidement ; dans les deux cas, sa propagation par voie de conductibilité se trouve limitée.

§ 3. CONDUCTIBILITÉ DES LIQUIDES ET DES GAZ.

Les expériences qu'on a faites pour mesurer la conductibilité des liquides et des gaz prouvent que cette conductibilité est très faible. Cependant on voit la chaleur se propager avec assez de rapidité dans ces deux sortes de milieux. Mais alors ce n'est plus par conductibilité, c'est par *convection*, c'est-à-dire par transport des parties échauffées. La raison de tels mouvements est aisée à comprendre. Quand une portion de liquide est chauffée, sa densité diminue ; dès lors, en vertu du principe d'Archimède, cette portion tend à s'élever et à remplacer les couches plus denses qui la surmontent. C'est ce qui arrive quand on chauffe un liquide par le fond du vase qui le contient. Si le liquide est chauffé latéralement, les courants qui s'établissent partent seulement des parois, au lieu de partir de tous les points du fond. L'échauffement, dans ce cas, est beaucoup moins rapide. Du reste, l'existence des courants dont il s'agit est facile à mettre en évidence. On n'a qu'à mêler au liquide des poudres de même densité que lui, par exemple de la sciure de bois dans l'eau. Cette poudre reste en suspension, et dès qu'on chauffe le vase, on voit le mouvement

des particules, de haut en bas et de bas en haut, accuser l'existence des courants : les courants ascendants proviennent des parties échauffées qui s'élèvent, les courants descendants sont dus aux parties froides plus denses qui remplacent les premières ; si le vase est chauffé latéralement, les premiers règnent, pendant la période d'échauffement, contre les parois du vase, les courants descendants occupent la partie centrale. La chaleur est donc charriée dans toute la masse du liquide, et c'est ainsi qu'elle se propage.

Quand le liquide se refroidit, les courants changent de sens: c'est le courant central qui monte, tandis que sur les parois se trouvent les courants descendants. Leur situation relative s'explique aisément : c'est en effet par les parois que la chaleur se communique d'abord au liquide lorsqu'on chauffe le vase ; c'est par les parois qu'elle se dissipe d'abord dans la période de refroidissement.

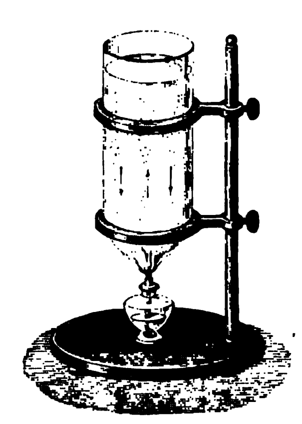


Fig. 161. — Courants ascendants et descendants dans les liquides.

Si toutefois le vase est large et profond et chauffé par-dessous, comme dans la figure 161, les mouvements sont précisément contraires à ceux que nous venons d'indiquer, parce que c'est la partie centrale du fond qui communique la première sa chaleur au liquide.

Rumford niait la propriété conductrice des liquides. Mais Murray combattit son opinion par des expériences décisives. Il plaçait le réservoir d'un thermomètre sur le fond d'un cylindre de glace, alternativement rempli d'huile et de mercure, versait de l'éther à la surface du liquide et y mettait le feu. Dans les deux cas, le thermomètre s'élevait de plusieurs degrés, et l'on ne pouvait attribuer cette augmentation de température à la communication par les parois du vase, puisque la glace absorbe la chaleur, ni au rayonnement seul, puisque le mercure est athermane, ni enfin aux courants du liquide, puisque les

couches les plus chaudes et les plus légères sont à la partie supérieure du vase.

Ainsi la conductibilité des liquides n'est pas nulle, comme l'a prouvé Despretz en chauffant par la base supérieure un vase cylindrique en bois rempli du liquide à étudier. Pour cela, un vase en cuivre mince A était placé en contact avec la surface de l'eau du tonneau, à sa partie supérieure ; il recevait, par le tuyau C, de l'eau bouillante qu'on renouvelait de cinq en cinq minutes en la faisant écouler par le tuyau D. Douze thermomètres (la figure 162 n'en montre que six) dont les boules étaient engagées à diverses hauteurs dans le liquide, et dont les tiges étaient extérieures au vase, servaient à mesurer les températures de la colonne d'eau. Il fallut 36 heures pour qu'ils devinssent stationnaires, et ils indiquèrent alors des températures décroissantes depuis les couches supérieures jusqu'à la moitié du vase, qui avait un mètre de hauteur. Les six thermomètres inférieurs ne montèrent pas d'une manière sensible. Despretz, en comparant entre elles les températures des couches successives, constata qu'elles suivent la même loi que dans le cas d'une barre métallique[1], de sorte que la propagation de la chaleur se fait dans les liquides de la même manière que dans les solides. Mais la conductibilité des solides est incomparablement plus grande que celle des liquides.

Celle des gaz n'a pu être constatée, à cause de la difficulté qu'on éprouve à faire la part, dans la mesure des températures des couches, de l'échauffement provenant du rayonnement et du mélange des couches entre elles, de manière à distinguer la part qui est due à la seule conductibilité. Tout ce qu'on sait,

1. Voici les nombres mesurant les excès de température des six thermomètres sur l'air ambiant, et les quotients de chaque excès par le suivant :

1er thermomètre.	29°,21	»
2e —	20°,57	1,42
3e —	14°,78	1,39
4e —	10°,35	1,42
5e —	7°,22	1,43
6e —	5°,93	1,45

On voit que le rapport de deux excès consécutifs est sensiblement constant.

c'est qu'ils sont certainement de très mauvais conducteurs de la chaleur. Les masses gazeuses s'échauffent, comme les masses liquides, par transport ou convection : grâce à leur grande dilatabilité, dès qu'une portion de masse gazeuse se trouve échauffée, soit par rayonnement, soit par contact, son volume s'accroît, et il en résulte des mouvements qui mélangent les diverses couches. La chaleur se trouve ainsi charriée comme

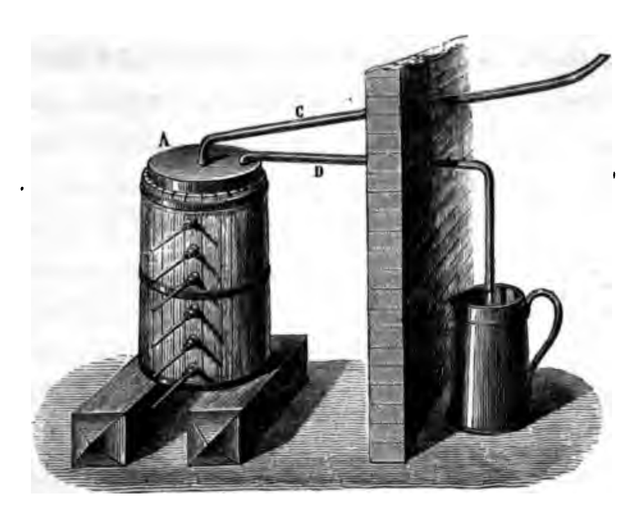


Fig. 162. — Expérience de Despretz sur la conductibilité des liquides.

dans les liquides, mais avec une rapidité encore plus grande. Aussi, dès qu'on gêne les mouvements dont nous parlons, en emprisonnant le gaz dans les interstices que laissent entre leurs fragments des substances filamenteuses comme le coton, la laine, la soie non tissée, le duvet, etc., le gaz s'échauffe difficilement, ainsi qu'il résulte d'un grand nombre d'expériences dues à Thomson. Nous avons vu plus haut que c'est en partie à cette propriété des gaz, de conduire très mal la chaleur quand ils sont en repos, que les vêtements doivent de préserver le corps des pertes de chaleur pendant les temps froids.

CHAPITRE XIV

LES SOURCES DE CHALEUR — SOURCES D'ORIGINE COSMIQUE

§ 1. LA CHALEUR DU SOLEIL; INTENSITÉ DE LA RADIATION SOLAIRE.

Il résulte de l'étude que nous venons de faire des phénomènes calorifiques, que deux ou plusieurs corps mis en présence font un échange mutuel et continu de chaleur, soit par rayonnement et à distance, soit par conductibilité. Il se peut que, par le fait de cet échange, il y ait équilibre de température; mais quand il n'en est pas ainsi, quand la température d'un corps s'élève aux dépens de la chaleur qu'un autre corps lui envoie, ce dernier corps est pour le premier une source de chaleur. A ce point de vue, un morceau de glace à 0°, qui est une *source de froid* pour tout corps placé en sa présence, et dont la température est supérieure à zéro, est au contraire une *source de chaleur* pour un corps dont la température est inférieure à la sienne.

Dans l'acception vulgaire, cette expression de source de chaleur est plus particulièrement réservée aux corps doués d'une haute température, qui émettent d'une façon continue, pour un temps limité ou même en apparence indéfini, une certaine quantité de chaleur. Les solides et les gaz incandescents, ce qu'on nomme le feu, la flamme, sont des sources de chaleur de cet ordre : on peut aussi ranger dans la même catégorie les corps qui émettent de la chaleur obscure à une

température élevée, par exemple de l'eau en ébullition. Mais pour le physicien toutes ces distinctions sont purement arbitraires : tout corps, dans quelque état et à quelque température qu'il soit, est une source de chaleur, s'il envoie par un mode quelconque de propagation, rayonnement ou conductibilité, de la chaleur au milieu ambiant et aux corps qui s'y trouvent placés.

On donne aussi fréquemment le nom de sources de chaleur aux divers modes de production de la chaleur : dans ce sens, le frottement, la percussion, l'électricité, la combustion, c'est-à-dire certaines actions physiques ou chimiques, sont dits des sources de chaleur. Il y a là, croyons-nous, une confusion fâcheuse entre la cause et l'effet. Ce sont des modes de production, non des sources de chaleur.

Enfin on classe quelquefois les sources de chaleur en permanentes et temporaires ou accidentelles, en naturelles et artificielles, en cosmiques et terrestres; mais ces classifications, n'étant pas basées sur la nature même des choses, ne nous apprendraient rien de plus que l'étude particulière de chaque espèce de source. Bornons-nous donc à les passer en revue les unes après les autres, en commençant par la plus importante de toutes, au moins pour la Terre, par le Soleil.

Cet astre est composé d'un noyau incandescent, dont les contours nettement limités forment le disque visible, et dont la surface est ce qu'on nomme la *photosphère;* une couche relativement mince d'hydrogène incandescent, d'où partent des jets intermittents de même nature, repose sur la surface photosphérique et a reçu le nom de *chromosphère.* Enfin, au delà, existe une enveloppe beaucoup plus rare et plus étendue, dont l'existence n'a pu être constatée que pendant les éclipses totales de Soleil et qu'on nomme la *couronne* (fig. 165). Ces enveloppes successives du noyau solaire forment autour de lui une atmosphère gazeuse plus ou moins complexe, mais éminemment absorbante, ainsi que le prouvent l'analyse du spectre solaire et les raies nombreuses dont nous avons vu que ce spectre est

sillonné. Quant au noyau, les opinions des savants sur sa nature sont partagées : les uns le considèrent comme un solide ou un liquide incandescent, d'autres comme une masse gazeuse pareillement incandescente. Nous dirons plus loin quelles hypothèses ont été proposées pour expliquer comment se renouvelle et s'entretient l'immense provision de lumière et de chaleur

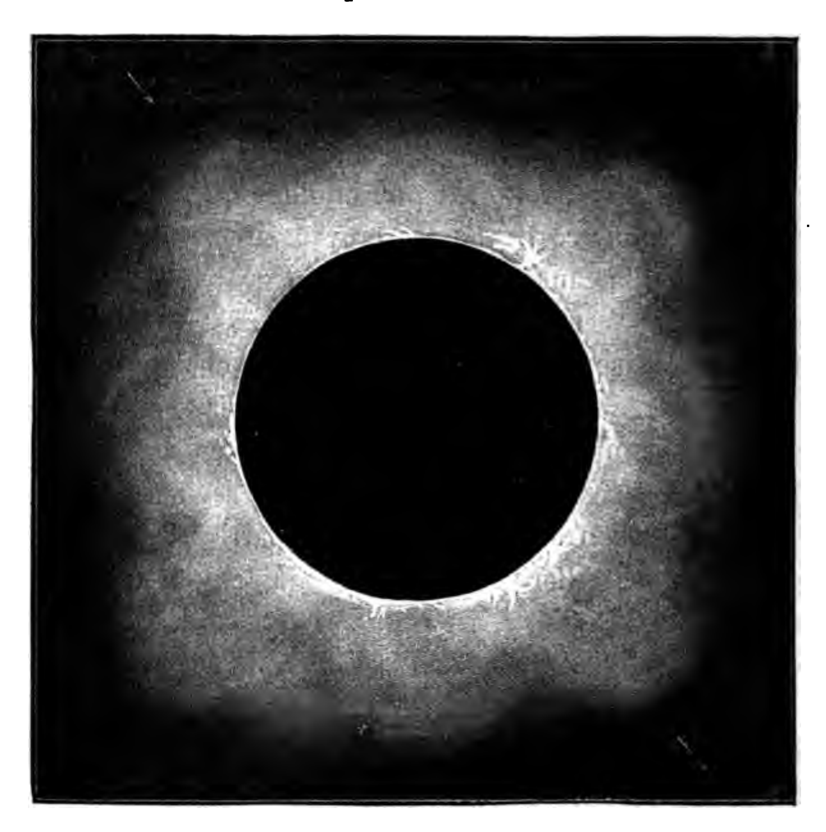


Fig. 163. — Chromosphère et protubérances solaires. Atmosphère coronale.

qu'il rayonne tout autour de lui dans l'espace, et dont l'intensité ne paraît pas avoir sensiblement varié depuis des milliers d'années.

Mais l'intensité de la chaleur solaire, telle qu'elle nous parvient à la surface du globe terrestre, lorsqu'elle a traversé les couches atmosphériques, a pu être évaluée à l'aide d'appareils que nous allons décrire ; et, en tenant compte des heures d'observation ou des hauteurs différentes que l'astre occupait au-

dessus de l'horizon, il a été possible d'en déduire l'absorption de chaleur résultant de l'interposition de l'atmosphère terrestre. Cette absorption est un fait que chacun de nous peut constater, puisque nous en voyons et en ressentons les effets; l'intensité de l'action directe des rayons solaires va en croissant à mesure que croît sa hauteur, et devient maximum au moment de sa culmination méridienne. De même, cette intensité maximum varie elle-même considérablement, et pour la même raison, avec la saison de l'année[1].

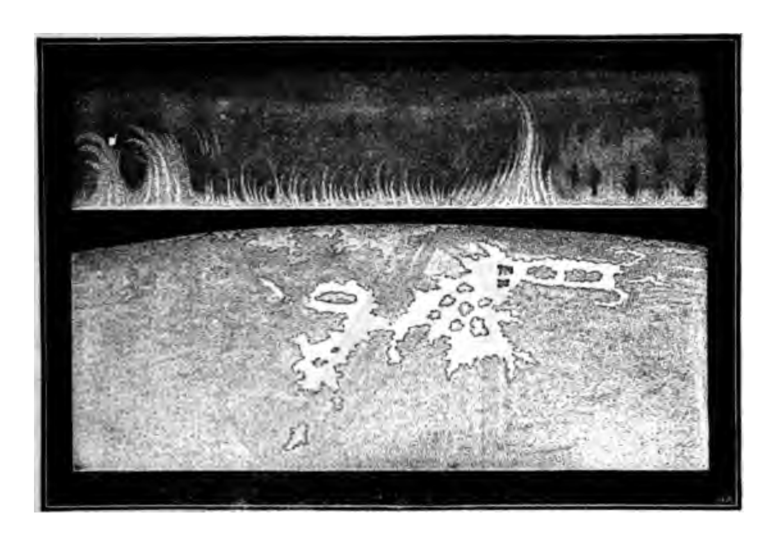


Fig. 164. — Structure du Soleil. Aspect de la photosphère et de l'enveloppe chromosphérique.

Les premières expériences sur ce sujet sont dues à de Saussure. Il observait à l'aide d'un appareil de son invention, l'*héliothermomètre*, consistant en un thermomètre renversé dont la boule noircie occupait l'intérieur d'une boîte de liége, à parois également noircies, que fermaient des plaques de verre. En exposant l'appareil à l'action normale des rayons

1. Il ne faut pas, bien entendu, confondre la température de l'air, au soleil, avec la chaleur rayonnée directement par l'astre. Celle-ci est la même, à égalité de hauteur, en hiver qu'en été, quand les conditions relatives à la transparence de l'air et à son état hygrométrique sont les mêmes, tandis qu'il en est tout autrement de la température de l'air. Il fait froid sur les hautes montagnes à l'ombre et par un ciel très pur, tandis que la radiation solaire y est très intense, en raison de la moindre épaisseur des couches aériennes et de l'absorption moindre qui en est la conséquence.

solaires, de Saussure notait le nombre de degrés dont montait le thermomètre au bout d'une minute.

Sir John Herschel fit, au cap de Bonne-Espérance, des observations du même genre, en se servant d'un appareil analogue, qu'il nommait *actinomètre*.

Enfin, en 1837, Pouillet a mesuré l'intensité de la radiation solaire à Paris, à l'aide d'une méthode et d'un instrument que nous allons décrire.

L'instrument dont ce dernier savant s'est servi pour cette



Fig. 165. — Pyrhéliomètre de Pouillet.

mesure, et qu'il nomme *pyrhéliomètre*, est représenté dans la figure 165. On voit, à la partie supérieure, un vase cylindrique en argent très mince, dont la face tournée au Soleil est recouverte de noir de fumée. Ce vase est rempli d'eau, et la température du liquide est indiquée par un thermomètre dont la boule vient plonger à l'intérieur du cylindre, et dont la tige est protégée par un tube en laiton percé longitudinalement

d'une rainure, de manière à laisser voir le niveau du mercure. A l'autre extrémité du tube, un disque, de même diamètre que le vase cylindrique, reçoit l'ombre de ce dernier, et permet de vérifier si la surface noircie est exposée normalement à la direction des rayons du Soleil : c'est ce qui arrive quand le disque inférieur est exactement recouvert par l'ombre circulaire du disque supérieur. Voici comment on procède à l'expérience.

On commence par noter la température de l'instrument; puis on expose sa face noircie vers une portion du ciel sans nuages, mais de manière que cette face ne reçoive pas les rayons solaires. Au bout de cinq minutes, le rayonnement détermine un certain abaissement de température. En dirigeant alors l'instrument vers le Soleil, la face noircie reçoit pendant cinq autres minutes la chaleur solaire tombant perpendiculairement sur elle. On note l'élévation de température. Enfin on fait de nouveau rayonner l'instrument pendant cinq minutes dans sa première position, et l'on observe encore le refroidissement final. La première et la troisième observation sont nécessaires pour calculer la quantité de chaleur perdue par le rayonnement de l'instrument dans l'espace pendant son exposition au Soleil, quantité qui est une moyenne entre les deux refroidissements observés. En l'ajoutant à l'échauffement dû à l'exposition directe aux rayons solaires, on aura l'élévation de température totale; et, par suite, on pourra calculer le nombre de calories absorbées pendant une minute par une surface égale à celle du disque noirci[1].

1. « Soit g le réchauffement qu'a éprouvé le pyrhéliomètre pendant les cinq minutes de l'action solaire, r et r' les refroidissements qu'il a éprouvés pendant les cinq minutes qui ont précédé cette action et pendant les cinq minutes qui l'ont suivie; il est facile de voir que l'élévation de température t produite par la chaleur du Soleil est

$$t = g + \frac{r + r'}{2}.$$

Soit d le diamètre du vase exprimé en centimètres, p le poids de l'eau qu'il contient, exprimé en grammes, p' le poids du vase lui-même et de la portion plongée du thermomètre, ce poids étant réduit à ce qu'il serait pour une chaleur spécifique égale à l'unité : on voit

Cette quantité de chaleur dépend, comme on le pense bien, de l'élévation du Soleil au-dessus de l'horizon; car, avant de parvenir à la surface de la Terre, les rayons calorifiques du Soleil ont à traverser des couches atmosphériques, qui en absorbent une proportion d'autant plus considérable que leur épaisseur est plus grande. Pouillet a cherché la loi que suit l'intensité calorifique du Soleil à mesure que varie la hauteur de l'astre[1], et il en a conclu l'absorption due à l'atmosphère pour le cas où le Soleil serait au zénith. Cette absorption varie d'ailleurs dans certaines limites, suivant la pureté de l'atmosphère, et peut s'élever à 0,25, c'est-à-dire au quart de la chaleur qui parviendrait au sol si l'atmosphère n'existait pas. En considérant la chaleur totale reçue par un hémisphère entier, et par conséquent sous toutes les obliquités possibles, on trouve que la proportion absorbée par l'atmosphère si

que l'élévation de température observée t correspond à une quantité de chaleur $t\,(p + p')$. Cette chaleur étant tombée en cinq minutes sur une surface $\frac{\pi d^2}{4}$, chaque unité de surface a reçu $\frac{4(p + p')}{\pi d^2}\,t$ pendant les cinq minutes, et $\frac{4(p + p')}{5\pi d^2}\,t$ pendant une minute. Pour mon appareil, cette quantité de chaleur reçue en une minute par chaque centimètre carré est 0,2624 t. » (*Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1838, II.)

1. « En comparant les élévations de température observées au pyrhéliomètre et les épaisseurs atmosphériques correspondantes, j'ai vu que l'on pouvait très bien représenter les résultats par la formule $t = ap^{\varepsilon}$, a et p étant deux constantes. De plus, en déterminant ces deux constantes par deux observations de chaque série, on retombe toujours sur la même valeur de a pour toutes les séries, et sur des valeurs de p assez différentes en passant d'une série à l'autre. Ainsi, a est une constante fixe, indépendante de l'état de l'atmosphère, et p une constante qui est fixe seulement pour le même jour, et qui varie d'un jour à l'autre suivant que la sérénité du ciel est plus ou moins parfaite; a est donc, dans la formule, la *constante solaire*, ou celle qui contient, comme élément essentiel, la puissance calorifique constante du Soleil : tandis que p est la *constante atmosphérique*, ou celle qui contient, comme élément essentiel, le pouvoir de transmission variable dont se trouve douée l'atmosphère pour laisser arriver jusqu'à la surface de la Terre des proportions plus ou moins grandes de la chaleur solaire incidente. » (Pouillet, *loc. cit.*)

Les expériences, faites de juin 1837 à mai 1838, ont donné à Pouillet 6°,72 pour la valeur de la constante solaire, et des nombres variant entre 0,7244 et 0,7888 pour la constante atmosphérique.

En supposant p égal à l'unité, c'est-à-dire dans l'hypothèse où l'atmosphère transmettrait intégralement la chaleur solaire sans en rien absorber, on aurait $t = 6°,72$, et en multipliant par 0,2624, on aurait 1,7633. Telle est, en calories, la quantité de chaleur que le Soleil donne, en une minute, sur chaque centimètre carré, aux limites de l'atmosphère, ou qu'il donnerait à la surface du sol en l'absence de toute absorption atmosphérique.

le ciel était partout sans nuages, serait encore comprise entre les quatre dixièmes et les cinq dixièmes de la chaleur envoyée par le Soleil à la Terre. Le sol terrestre ne reçoit donc guère que la moitié de la chaleur solaire, moitié qui se distribue inégalement suivant l'obliquité des rayons : l'autre moitié échauffe l'atmosphère.

Supposant la chaleur reçue par la Terre uniformément répartie, Pouillet a calculé qu'un centimètre carré reçoit par minute 0,441 calorie, c'est-à-dire une quantité de chaleur suffisante pour élever de 1 degré la température de $0^{gr},441$ d'eau. En une année, chaque centimètre carré reçoit 231 675 calories : la quantité de chaleur reçue en une année par la Terre entière serait suffisante pour fondre une couche de glace de 31 mètres d'épaisseur enveloppant tout le globe[1].

De la quantité de chaleur reçue annuellement par la Terre on peut déduire la chaleur totale rayonnée par le Soleil dans l'espace. Il suffit, pour cela, de calculer combien la surface d'un grand cercle terrestre est contenue de fois dans la surface d'une sphère qui aurait le centre du Soleil pour centre et pour rayon la distance de cet astre à notre globe. Un calcul facile donne pour résultat 2 150 000 000, de sorte que la chaleur interceptée par la Terre n'est que la 2 150 000 000e partie du rayonnement solaire tout entier. « Si la chaleur émise par le Soleil, dit Tyndall, était employée à fondre une couche de glace déposée à sa surface, en une heure elle liquéfierait une épaisseur de 732 mètres. Dans le même temps, elle élèverait à la température de l'ébullition 2 900 000 000 myriamètres cubes d'eau à 0°. Exprimée sous une autre forme, la chaleur émise par le Soleil en une heure est égale à celle qu'engendrerait la combustion d'une couche de houille de 5 mètres d'épaisseur, enveloppant le Soleil; enfin, la chaleur solaire

1. Pouillet, pour faire ce calcul, employait le nombre 75 pour la chaleur latente de fusion de la glace. Avec la valeur adoptée aujourd'hui, c'est-à-dire 79,25, le résultat serait plus faible : au lieu de $30^m,89$, on trouve seulement $29^m,23$; mais cette correction n'a qu'un faible intérêt, le nombre qui mesure la constante solaire n'étant qu'une valeur approchée, et les nouvelles déterminations donnant, ainsi qu'on le verra bientôt, des valeurs plus fortes.

émise en un an équivaut à celle que produirait la combustion d'une couche de houille de 27 kilomètres d'épaisseur. »

Telle est, d'après les expériences de Pouillet, l'intensité calorifique de l'immense foyer qui fournit à la Terre et aux autres planètes leur provision de chaleur, et, comme nous le verrons, ce qui revient au même, leur provision de vie et de force mécanique.

La mesure de l'action calorifique des rayons solaires, soit à la surface du sol et sous diverses obliquités, soit à la limite de l'atmosphère en tenant compte de l'absorption par les couches d'air, a été reprise, depuis les expériences de Pouillet, par divers savants. Avant de rapporter les résultats trouvés, mentionnons d'abord les observations faites de 1832 à 1842 par Forbes et Kæmtz, à l'aide de l'héliothermomètre de Saussure, à Brienz et sur le Faulhorn, c'est-à-dire à une différence d'altitude de 2119 mètres. D'après ces savants, le faisceau des rayons calorifiques solaires, en entrant dans notre atmosphère, se divise en deux parties, dont l'une est composée des rayons facilement absorbables, l'autre des rayons qui se refusent à toute extinction : les premiers forment les huit dixièmes, et les seconds les deux dixièmes du faisceau total. L'atmosphère est donc thermochroïque, ainsi que l'ont prouvé du reste les expériences de Melloni. En 1853, de Gasparin fit des recherches relatives à l'influence du rayonnement solaire sur la végétation; l'appareil qu'il employait se composait d'une boule en cuivre de 10 centimètres de diamètre, recouverte d'une double couche de vernis mat au noir de fumée, et contenant intérieurement la boule d'un thermomètre très sensible. Les expériences faites en février à Tarascon, lui montrèrent que l'atmosphère absorbait alors les 0,32 de la radiation solaire totale. En mai, le même appareil donnait, à Versailles, 0,57 à huit heures du matin, 0,27 à midi, et 0,24 à six heures du soir. Ces résultats concordaient avec ceux de Pouillet.

La même question a été reprise dans ces dernières années, et la valeur numérique de la constante solaire, déduite de nou-

velles observations, augmentée. M. Crova, employant tantôt le pyrhéliomètre direct à eau de Pouillet[1], tantôt le même appareil où l'eau est remplacée par le mercure, tantôt enfin un actinomètre formé d'un gros thermomètre à alcool dont la boule occupe le centre d'un ballon sphérique noirci, a fait, en 1875, plusieurs séries d'observations d'où résulte une valeur de la constante solaire un peu plus forte que celle de Pouillet. La moyenne des nombres trouvés donnerait $2^c,015$ pour la quantité de chaleur reçue par minute, sur 1 centimètre carré, aux limites de l'atmosphère. Les observations faites d'abord à Montpellier furent continuées à la campagne et au bord de la mer, pour éviter les causes d'erreur provenant d'une absorption anormale de chaleur par les vapeurs, les fumées et les poussières, causes d'erreur qui varient d'ailleurs avec le degré d'agitation de l'air et la direction du vent.

Dans le cours de la même année, M. Violle a cherché à tenir compte de l'influence que peut exercer la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur l'absorption atmosphérique. Pour cela, il s'adjoignit un second observateur qui effectuait les mesures actinométriques au pied du mont Blanc, tandis qu'il mesurait lui-même l'énergie du rayonnement solaire au sommet et sur les flancs de la montagne[2]. Par une méthode différente

1. Outre le pyrhéliomètre décrit plus haut, auquel Pouillet donnait le nom de *pyrhéliomètre direct*, ce physicien employait un *pyrhéliomètre à lentilles* pour le cas où les expériences ne pouvaient se faire dans un air calme. La modification apportée par M. Crova au pyrhéliomètre Pouillet consiste dans la substitution au noir de fumée, employé comme couche absorbante, d'un dépôt galvanoplastique légèrement rugueux recouvrant la boîte cylindrique de l'appareil ; par-dessus cette couche de cuivre était déposé de la même manière du noir de platine intimement adhérent ; et enfin une légère couche de noir de fumée était appliquée sur la surface platinée. Selon lui, en exposant à l'insolation la surface polie de la boîte d'argent recouverte d'une ou plusieurs couches de fumée, ainsi que le faisait Pouillet, l'absorption de la chaleur était incomplète : une partie de la chaleur obscure, réfléchie par la surface métallique polie, traversait le noir de fumée, qui est diathermane pour ces radiations. Tyndall avait déjà remplacé par du mercure l'eau du pyrhéliomètre Pouillet; la boîte qui contenait le liquide était alors en acier, et non en argent.

2. L'ascension de M. Violle eut lieu le 16 août 1875, et les observations se firent dans la matinée de ce jour, au sommet ainsi qu'au glacier des Bossons, c'est-à-dire aux altitudes respectives de 4810 mètres et de 1200 mètres. Le lendemain, 17 août, elles recommencèrent aux Grands-Mulets (3050 mètres) et aux Bossons, les unes et les autres par un ciel superbe et un air absolument calme. Le second observateur était M. Margottet.

de celle de Pouillet, M. Violle a trouvé pour la constante solaire 6°,958, nombre un peu supérieur à celui qu'avait obtenu ce physicien, 6°,72. Il en résulte, pour la quantité de chaleur tombant pendant une minute sur 1 centimètre carré, à la limite de l'atmosphère, 2c,54, qui dépasse de beaucoup le résultat de Pouillet, 1c,7633.

Il est intéressant de comparer l'influence de l'absorption atmosphérique à diverses altitudes; c'est ce que permet le tableau suivant calculé par M. Violle :

	Altitudes.	Chaleur reçue
Limite de l'atmosphère.	»	2c,540
Cime du mont Blanc	4810m	2c,592
Grands-Mulets.	3050	2c,262
Glacier des Bossons	1200	2c,022
Cote de Paris.	60	1c,745

Comme on le voit, l'énergie de la radiation solaire que les calculs de Pouillet nous avaient déjà fait trouver si incomparablement puissante, serait plus considérable encore, d'après les plus récentes déterminations. En introduisant ces nouveaux nombres dans les énoncés du savant physicien, on exprimera de la façon suivante l'intensité de la radiation calorifique du Soleil :

« Si la quantité totale de chaleur que la Terre reçoit du Soleil dans le cours d'une année était uniformément répartie sur tous les points du globe, et qu'elle y fût employée, sans perte aucune, à fondre de la glace, elle serait capable de fondre une couche de glace qui envelopperait la Terre entière, et qui aurait une épaisseur de 33m,4 si l'on adopte le chiffre de M. Crova, et de 42m,1 si l'on prend celui de M. Violle. »

De même : « Si la quantité totale de chaleur émise par le Soleil était exclusivement employée à fondre une couche de glace qui serait appliquée sur le globe du Soleil et qui l'envelopperait de toute part, cette quantité de chaleur serait capable de fondre en une minute une couche de 12m,8 ou de 16m,0 et en un jour une couche de 28 ou de 37 kilomètres. »

Il faut ajouter, avec Pouillet, que ces déterminations sont indépendantes de toute hypothèse sur la nature propre du

Soleil, de la matière qui le compose, de son pouvoir rayonnant, de sa température et de sa chaleur spécifique. Mais leur plus ou moins d'exactitude dépend de celle des expériences qui ont servi à la mesure des radiations à la surface de la Terre, et surtout de la loi qui exprime l'absorption atmosphérique.

§ 2. TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

Les astronomes ont abordé une série d'autres questions relatives aux radiations solaires; ils se sont demandé, par exemple, si ces radiations ont une égale intensité sur les diverses régions de l'astre, dans les zones polaires et dans la zone équatoriale; si l'un des hémisphères ne rayonne pas vers la Terre plus de chaleur que l'autre; si la température des taches, dans leurs noyaux et leurs pénombres, est inférieure ou supérieure à celle de la photosphère et des taches brillantes ou facules. Dans le cas où les radiations de ces diverses parties seraient sensiblement inégales, on comprend qu'il pourrait en résulter des effets intéressant notre planète, effets qu'on pourrait en quelque sorte prévoir, puisque le nombre et l'étendue des taches varient périodiquement. Des observations ont été faites par divers savants, Secchi, Chacornac, Langley, etc., dans le but d'élucider tous ces points d'astronomie physique. Nous renverrons le lecteur aux ouvrages spéciaux qui les ont rapportées.

Une question beaucoup plus difficile et dont la solution divise aujourd'hui encore les savants, physiciens aussi bien qu'astronomes, c'est celle de la température du Soleil.

C'est en effet une question fort complexe. Le Soleil, dans l'état actuel des connaissances astronomiques, n'est pas une masse homogène; il se compose d'un noyau sphérique qui nous est inaccessible, ou, si l'on veut, à l'intérieur duquel notre vue ne peut pénétrer, à moins qu'on ne considère les taches dont il est accidentellement parsemé comme des ouvertures laissant entrevoir la masse centrale et les talus de ses enveloppes. La

photosphère ou surface extérieure limitant le noyau est considérée comme la principale source d'où émanent les radiations solaires; mais elle est environnée elle-même d'une couche dont l'épaisseur varie et au sein de laquelle naissent les protubérances : c'est la chromosphère, qui est formée en grande partie d'hydrogène incandescent. Enfin, par delà la chromosphère est encore une atmosphère beaucoup plus étendue et beaucoup plus rare, dont la présence donne lieu pendant les éclipses totales de Soleil au phénomène de la couronne.

Le noyau solaire et ses enveloppes successives sont, au point de vue qui nous occupe, dans des états physiques sans doute fort différents; ils sont le siège de phénomènes chimiques encore mal définis, malgré les intéressantes découvertes dont l'analyse spectroscopique a doté la science, et il n'est pas douteux que, du noyau interne aux couches extérieures de la photosphère, à la chromosphère et enfin à la couronne, la température doive varier dans des limites fort étendues. En tout cas, si l'on cherche à évaluer cette température par l'expérience, c'est-à-dire en partant de la mesure de l'intensité de la radiation solaire, telle qu'elle peut se faire à la surface de la Terre, il est d'abord bien évident que c'est la résultante des actions des diverses couches qui pourra servir de point de départ, et non pas isolément la radiation de la surface du noyau, par exemple, ainsi qu'on l'entend généralement quand on parle de la température du Soleil. Les différentes couches qui enveloppent ce noyau exercent sur les radiations photosphériques une absorption dont nous ne pouvons évaluer ni l'intensité totale ni l'intensité spéciale et propre aux rayons calorifiques de telle ou telle réfrangibilité. Les raies, en nombre si considérable, dont la partie lumineuse du spectre solaire est sillonnée, nous renseignent bien à la vérité sur l'absorption de cette partie importante des radiations solaires, mais non sur celle dont la partie obscure, la plus considérable au point de vue de l'action calorifique, peut être l'objet de la part de la chromosphère ou de l'atmosphère solaire extérieure.

C'est donc de la température moyenne ou résultante, provenant des actions combinées des diverses parties constituantes du Soleil, qu'il peut être question, lorsqu'on cherche à mesurer la température solaire. Même ainsi restreinte, la solution du problème reste encore indéterminée ; car, pour l'obtenir, on est obligé de faire des hypothèses sur un élément d'une importance capitale, à savoir sur la valeur du pouvoir rayonnant ou émissif de la substance qui compose le Soleil. Cette substance est-elle à l'état solide ou liquide, ainsi que certains physiciens et astronomes l'admettent encore aujourd'hui ? Est-elle au contraire gazeuse, comme d'autres savants le soutiennent, en considérant l'enveloppe visible ou photosphérique comme formée d'une accumulation de nuages constitués par des particules liquides ou solides incandescentes, moins chaudes que les couches internes et purement gazeuses de l'astre? De la réponse à ces questions doit résulter, en effet, le plus ou moins de probabilité des hypothèses proposées sur la valeur numérique du pouvoir émissif du Soleil.

Pouillet, après avoir, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, évalué l'intensité de la radiation solaire, a cherché à en déduire la température probable du Soleil. Partant de la formule de Dulong et Petit qui exprime la loi du refroidissement dans le vide, il a trouvé une relation simple entre la quantité de chaleur émise en une minute par l'unité de surface du corps rayonnant, son pouvoir émissif et sa température[1]. Puis, supposant successivement que le pouvoir émissif du Soleil est égal à l'unité, c'est-à-dire maximum, ou bien égal seulement à 0,1, comme celui des métaux polis, il arrive aux températures de 1461° ou de 1761°, dont la première est à peu près

1. La relation dont nous parlons est celle-ci : $84\,888 = 1{,}146 \, . \, fa^t$, où le nombre 84 888 représente en calories la quantité de chaleur émise en une minute par 1 centimètre carré de la surface du Soleil, f le pouvoir émissif de cette surface et t sa température. a est la constante de Dulong, 1,0077, dans la formule du refroidissement, et 1,146 une constante qui dépend des unités de temps et de surface.

Si dans cette relation on remplaçait le nombre 84 888 par 122 240, qui résulte de la constante solaire calculée par M. Violle, on arriverait aux deux températures de 1510° et 1810° pour le Soleil, selon qu'on supposerait le pouvoir émissif égal à 1 ou à 0,1.

celle de la fusion du fer, tandis que la seconde atteint la température de fusion du platine.

D'autres nombres, beaucoup plus considérables, ont été proposés depuis par divers savants. Le docteur Zœllner, partant de l'hypothèse que le noyau solaire est un solide incandescent recouvert d'une couche liquide pareillement incandescente, et considérant les protubérances comme engendrées par des éruptions gazeuses sorties du noyau sous une pression énorme, a tiré de considérations thermodynamiques que nous ne pouvons mentionner ici, une évaluation de la température des gaz dans l'atmosphère du Soleil : elle n'atteindrait pas moins de 27 700°, et cette température varierait entre 68 000 et 75 000° pour les masses gazeuses au moment de leur sortie des couches sous-jacentes.

Le P. Secchi admettait une température beaucoup plus considérable encore, qu'il évaluait, avec Watterston, à 9 ou 10 millions de degrés. Son point de départ était une série de mesures actinométriques effectuées dans l'Inde par ce dernier savant, qui avait obtenu 27° pour l'élévation de température d'un thermomètre soumis à la radiation solaire dans une enceinte noircie. Ericsson trouvait de son côté 2290000°. Enfin Secchi, appliquant le même calcul aux résultats fournis par les observations de M. Soret (sur le mont Blanc) et de M. Violle, arrivait à des chiffres de 5 millions ou de 3 millions de degrés.

L'énorme discordance des résultats que nous venons de rappeler et de ceux de Pouillet, bien que les uns et les autres fussent obtenus par des procédés d'observation différents, ne pouvait s'expliquer par des erreurs d'observation. Et en effet, MM. Violle, Crova, Vicaire, partant des mêmes données ou de leurs observations propres (que nous avons mentionnées plus haut), ont trouvé pour la température du Soleil des nombres qui ne s'écartent pas sensiblement de ceux que l'expérience a permis de constater dans les sources calorifiques terrestres les plus intenses. M. Vicaire adopte 1398°, nombre peu différent de celui de Pouillet; M. Violle, partant de ses mesures

actinométriques au sommet du mont Blanc, arrive à un chiffre voisin de 1500°.

En résumé, les évaluations des savants français que nous venons de citer donnent, pour la température moyenne probable du Soleil, un nombre de degrés inférieur à ceux qui mesurent les hautes températures des foyers de nos usines et de nos laboratoires; en tenant compte des incertitudes qui règnent encore sur certains points du problème, cette température serait entièrement comparable à celle de nos flammes, et comprise entre 2000° et 3000°.

D'où vient donc la prodigieuse différence entre cette évaluation et les calculs de Secchi, de Watterston, d'Ericsson, qui assignent des millions de degrés à la température solaire? Elle provient presque tout entière de la différence d'interprétation des résultats des observations actinométriques, et non pas certainement des observations elles-mêmes, qu'on peut considérer comme suffisamment concordantes. Tandis que Secchi applique à ces résultats la loi de Newton sur le refroidissement, MM. Vicaire, Crova et Violle font usage de la formule que donne la loi de Dulong et Petit[1]. Il paraît évident que, dans ce cas et pour

1. La loi de Newton sur le refroidissement des corps dans le vide s'énonce ainsi : *La quantité de chaleur qu'un corps perd par rayonnement dans le vide, pendant l'unité de temps et pour l'unité de surface, est proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'enceinte.* Pour mesurer la radiation solaire, le P. Secchi expose au Soleil un thermomètre à boule noircie, placé dans une enceinte de température connue, à l'intérieur d'un cylindre à double enveloppe où circule un courant d'eau ou de vapeur. Il observe l'excès de température que prend le thermomètre sur celle de l'enceinte, et il le corrige de l'absorption atmosphérique. θ étant cet excès, T la température du Soleil, Σ la surface de l'enceinte ou d'une sphère concentrique au thermomètre, S la surface apparente du Soleil, celle de l'ouverture de l'enceinte par où pénètrent les rayons solaires, Secchi écrit l'équation $\Sigma\theta = ST$; d'où $T = \theta \frac{\Sigma}{S} = 183960\,\theta$. En prenant pour θ le nombre 29°,02, on arrive au chiffre de 5338520°. Malheureusement la loi de Newton n'est exacte que pour le cas de faibles excès de température, et ne peut évidemment s'appliquer au cas de la radiation solaire.

Pour les températures élevées, la radiation croît beaucoup plus rapidement que les températures, et alors c'est la loi de Dulong et Petit qui paraît seule applicable. Elle a été vérifiée au delà de 300° par ces physiciens et jusqu'à 1000° par Pouillet. D'après cette loi, les quantités de chaleur rayonnées croissent en progression géométrique, tandis que les températures croissent seulement en progression arithmétique. L'enceinte où se trouve le thermomètre du P. Secchi envoie à ce dernier une quantité de chaleur totale qui s'exprime par le terme Sa^{θ}, S étant la surface de l'enceinte, θ la température à laquelle parvient le thermo-

les hautes températures qu'il s'agit de mesurer, la première loi est inapplicable ; la seconde a été vérifiée, au contraire, dans des conditions qui se rapprochent de celles où se trouvent probablement les substances composant la matière solaire. D'autre part, parler de millions de degrés pour une température, c'est certainement sortir de toutes les données de l'expérience. Comme l'a fort bien dit, à cette occasion, Henri Sainte-Claire Deville, « parler de températures excessives et de leur mesure, c'est admettre que les gaz sont indéfiniment dilatables ou compressibles par la chaleur, ce qui n'est pas démontré ; ou bien, ce qui l'est encore moins, qu'il n'y a pas de limite à la température produite par les combinaisons chimiques. Dans le doute, je conserve cette opinion, fondée sur ma longue expérience des températures élevées, que les températures que nous produisons et mesurons dans nos laboratoires ne sont pas beaucoup dépassées dans la nature.

« Parler de la *surface* du Soleil, c'est supposer qu'il ressemble à un boulet rouge. Parler de la température à la *surface* de l'atmosphère solaire, c'est supposer qu'elle se termine brusquement par une couche incandescente. Enfin, calculer la température d'un point quelconque de la masse du Soleil avec des mesures photométriques, actinométriques et autres, c'est négliger absolument l'influence de la couche, peut-être extrêmement étendue, de la matière solaire obscure qui, selon toute apparence, se superpose à la couche incandescente, et dont le rayonnement vers la Terre est ainsi négligé. Dans tous ces calculs, il ne peut donc être question que de quantités de chaleur

mètre sous l'action des rayons solaires, et a étant un nombre constant déterminé par Dulong et égal à 1,0077. D'autre part, cette chaleur se compose de deux parties $Sa^t + \Sigma a^T$, la première provenant de l'enceinte même dont la température est t, la seconde due à la radiation solaire directe, T étant la température du Soleil, et Σ la surface de l'ouverture par laquelle les rayons solaires pénètrent dans l'enceinte. L'équation est alors $Sa^\theta = Sa^t + \Sigma a^T$. En substituant pour le rapport de Σ à S le nombre 185 960, supposant $t = 0°$ et $\theta = 29°,02$, on trouve 1398°, c'est-à-dire le nombre de M. Vicaire. M. Violle a déduit de ses observations actinométriques faites à Grenoble en 1874 le nombre 1354, qui, « pour donner la température *vraie* du Soleil, dit-il, doit encore être corrigé de diverses influences, et particulièrement de l'influence absorbante de l'atmosphère terrestre ».

émanées du Soleil tout entier et non de températures prises à sa *surface*.

« Voici peut-être un moyen d'aborder la question. Les raies de l'hydrogène qu'émettent certains points de la matière incandescente du Soleil sont déterminées par les observations astronomiques. MM. Frankland et Lockyer les ont retrouvées dans la flamme de l'hydrogène soumis à une certaine pression. On pourrait, par la méthode que j'ai déjà décrite, déterminer la température de combustion de l'hydrogène à cette même pression, et par suite la température et la pression des gaz dans les points de l'atmosphère solaire où les raies de l'hydrogène ont été observées. Je crois, d'après mes premières appréciations, que cette température ne sera pas bien éloignée de 2500 ou 2800°, nombres qui résultent des expériences de M. Bunsen et de celles que M. Debray et moi nous avons publiées depuis longtemps[1]. »

§ 3. TEMPÉRATURE DE L'ESPACE INTERPLANÉTAIRE.

Les doutes qui subsistent encore sur la véritable température du Soleil sont dus, comme on vient de le voir, beaucoup plus à l'incertitude où l'on est sur l'application de la loi qui lie les radiations à la température qu'aux inexactitudes des observations elles-mêmes. Celles-ci sont assez concordantes pour permettre de calculer les quantités de chaleur qui parviennent à la surface du sol, du fait de la radiation solaire, et même de calculer celle que reçoit l'unité de surface, dans l'unité de temps, aux limites de notre atmosphère. En résumé, l'énergie calorifique du rayonnement du Soleil est un élément désormais connu avec une suffisante approximation : elle est telle que chaque centimètre carré de cette surface limite reçoit en une minute 2 calories, c'est-à-dire est susceptible d'élever, en ce temps, la température de 1 gramme d'eau de 2 degrés centigrades.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1872, t. II.

Mais ce n'est pas du Soleil seulement que la Terre reçoit sa chaleur externe. Tous les astres rayonnent vers elle ; et comme les étoiles notamment ne sont autre chose, selon les données les plus certaines de l'astronomie, que des soleils, c'est-à-dire des corps à l'état d'incandescence, des sources de lumière et chaleur ; que leur nombre considérable peut, jusqu'à un certain point, compenser l'affaiblissement que leurs énormes distances font subir à leurs radiations, on peut se poser la question qui consisterait à évaluer la quantité de chaleur qu'elles envoient à la Terre.

Peut-être, grâce à la délicatesse de l'analyse spectrale, arrivera-t-on un jour à trouver dans la constitution des lumières stellaires des indices qui permettront de les classer suivant le rang qu'elles occupent dans l'échelle des températures. Déjà l'on sait que toutes ces étoiles ne sont pas identiques sous le rapport de leur constitution physique : tandis que les unes ont un spectre sillonné de raies sombres comme le spectre solaire, d'autres ne donnent que quelques lignes brillantes sur un faible spectre continu ; d'autres enfin ont un spectre caractérisé par des bandes cannelées. Dans toutes, il est évident que la lumière dont elles brillent indique l'incandescence de la matière qui les compose, et par suite une haute température ; les différences sont probablement causées par une absorption élective au sein d'atmosphères d'épaisseurs et de constitutions variables.

Heureusement il n'est pas nécessaire de résoudre ces questions difficiles, pour aborder celle qui est relative à la déterminotion de la quantité totale de chaleur que les étoiles rayonnent vers notre globe. Comme toutes ces radiations, en nombre indéfini, se croisent à la fois en chaque point de l'espace qui nous environne, on peut admettre que la résultante de toutes leurs actions combinées est la même dans une région du ciel assez étendue pour que tous ses points puissent être considérés comme situés à la même distance d'une quelconque d'entre elles. Tel est, par exemple, l'espace dans lequel se meut la Terre pendant sa révolution annuelle autour du Soleil. Seulement il

faudra, pour résoudre le problème, pouvoir éliminer l'effet prépondérant dû à la radiation solaire.

Posée en ces termes, la question est donc celle-ci : Quelle serait la température marquée par un thermomètre placé en un point de l'espace interplanétaire, et protégé par un écran contre l'action directe de la radiation du Soleil?

Voici comment Pouillet, dans son mémoire de 1838, est parvenu à la résoudre.

« Un thermomètre, dit-il, qui est exposé sur le sol au rayonnement nocturne, reçoit de la chaleur de deux sources différentes, savoir, de la part de l'espace et de la part de l'atmosphère. La chaleur de l'espace étant soumise à l'absorption comme la chaleur solaire pendant son trajet atmosphérique, il n'y en a en général que les 0,3 ou les 0,4 qui puissent arriver au thermomètre, du moins en supposant que les expériences ne soient pas faites sur les hautes montagnes. Quant à la chaleur émise par l'atmosphère elle-même dans le cours de la nuit, elle est l'effet du rayonnement individuel de toutes les couches concentriques que l'on peut concevoir depuis le niveau de la mer jusqu'aux limites de l'atmosphère, et elle dépend par conséquent de la distribution des températures dans toute la hauteur de la colonne atmosphérique ; nous pouvons ajouter que son influence est bien plus considérable qu'on ne l'a supposé jusqu'à présent. Quel que soit, au reste, le rapport des intensités de ces deux causes, il est évident qu'on peut concevoir une cause unique capable de produire un effet égal à celui qui résulte de leur action simultanée ; ou, en d'autres termes, on peut supprimer par la pensée la chaleur de l'espace et celle de l'atmosphère, et concevoir une enceinte, à pouvoir émissif maximum, dont la température soit telle, qu'elle envoie au thermomètre et au sol précisément autant de chaleur qu'ils en reçoivent à la fois de l'atmosphère et de l'espace : c'est la température inconnue de cette *enceinte zénithale* que j'appelle la *température zénithale*.

« Cette manière de concevoir les phénomènes n'a pas pour

objet de représenter les actions particulières et peut-être inégales que le thermomètre éprouve dans telle ou telle direction, mais seulement de représenter avec exactitude l'action définitive et totale à laquelle il est soumis, en sorte que son abaissement au-dessous de la température ambiante se trouve le même avec l'enceinte zénithale qu'avec l'atmosphère et l'espace réunis. C'est sous cette condition qu'il nous est permis de donner à l'enceinte zénithale une température uniforme dans toutes les portions de son étendue. Enfin, il est évident que la température zénithale est nécessairement variable, à chaque instant pour le même point de la surface de la Terre, et à plus forte raison variable d'un point à un autre, parce qu'elle se compose d'un élément fixe qui est la température de l'espace, et d'un élément sans cesse changeant qui est la température des diverses couches atmosphériques. »

Comment observer ou calculer cette température idéale? Pouillet employait, dans ce but, l'appareil que représente la figure 166. Quatre anneaux cylindriques superposés sont enfermés dans un cylindre de plaqué d'argent ; chacun d'eux est intérieurement garni de duvet de cygne et a un fond en peau de cygne. Le cylindre est enveloppé lui-même d'une peau de cygne, et, sur la face supérieure du duvet repose le thermomètre t, dont la tige extérieure permet de lire la température de l'appareil.

Un cylindre plus grand C′ porte le tout, et son rebord supérieur est calculé de telle sorte que le réservoir O du thermomètre ne voie que les deux tiers EOE de la surface hémisphérique du ciel.

Exposé au rayonnement du ciel pendant la nuit, l'actinomètre de Pouillet marque des températures toujours plus basses que celle d'un thermomètre suspendu dans l'air au-dessus du sol, mais toujours plus hautes que la température zénithale cherchée, puisqu'il ne voit que les deux tiers de la surface du ciel et qu'il est enveloppé d'une couche d'air qui le réchauffe. La question était de trouver une relation entre ces trois quan-

tités : la température de l'air ambiant, celle de l'actinomètre, toutes deux données par l'observation, et la température zénithale. Cette relation, Pouillet l'a cherchée en plaçant l'actinomètre au-dessous d'un ciel artificiel, formé d'un vase de zinc d'un mètre de diamètre, soutenu à 2 mètres de hauteur par trois colonnes minces ; ce vase, au fond noirci, était plein d'un mélange réfrigérant à —20°. Il plaçait l'actinomètre verticalement au-dessous et à des distances variables, et notait les trois températures après que l'équilibre était établi. Il trouva ainsi qu'on obtenait toujours la température du ciel arti-

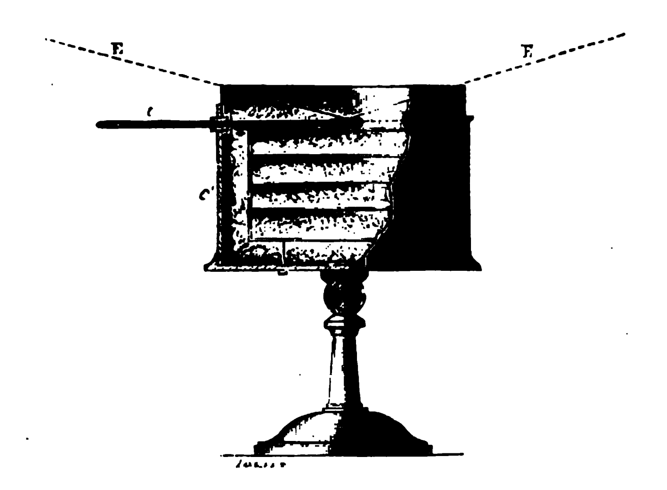


Fig. 166. — Actinomètre de Pouillet.

ficiel, si de la température ambiante on retranchait deux fois et un quart l'excès de cette température sur celle de l'actinomètre.

Les observations faites d'après cette méthode, et la température zénithale trouvée par cette règle, ont montré que cette température s'abaisse progressivement, du coucher du Soleil à son lever, comme la température de l'air. Pouillet en conclut que, « puisque la température zénithale éprouve dans une seule nuit des variations considérables, c'est une preuve évidente que le terme fixe (le rayonnement de l'espace) qui entre dans son expression, n'a qu'une très petite valeur par rapport au

terme variable (le rayonnement atmosphérique), et par conséquent que, dans le rayonnement nocturne, la chaleur de l'espace est très petite par rapport à la chaleur qui provient du rayonnement de l'atmosphère.

Ces données obtenues, Pouillet démontre que la température de l'espace est liée par une relation qu'il calcule, avec les deux constantes qui mesurent le pouvoir absorbant de l'atmosphère, d'une part pour la chaleur terrestre, d'autre part pour la chaleur de l'espace[1]. Il en déduit enfin pour la température de l'espace un nombre compris entre 115° et 175° au-dessous de zéro. « Les seules expériences que j'aie pu faire permettent déjà d'arriver à une certaine approximation ; elles me donnent — 142° pour la température de l'espace, et je ne pense pas que cette valeur puisse s'écarter beaucoup de la vérité. »

Fourier, avant Pouillet, avait indiqué, d'une manière générale, pour la chaleur de l'espace interstellaire, une température peu inférieure à 50° ou 60° au-dessous de zéro, c'est-à-dire à celle des régions polaires terrestres. La nouvelle détermination la fait beaucoup plus basse, de sorte que, si on l'adopte provisoirement, on doit considérer le froid qui règne dans les espaces interplanétaires comme dépassant en rigueur le froid le plus intense que nous ayons pu produire par des moyens artificiels et, à plus forte raison, que nous ayons pu observer à la surface de la Terre.

Ainsi, ces soleils innombrables, cette multitude d'étoiles que le ciel de nos nuits nous montre répandues dans l'immensité, en rayonnant toutes ensemble, le Soleil excepté, envoient dans l'espace une quantité de chaleur égale à celle que recevrait

1. b et b' étant ces deux constantes, a étant le nombre de Dulong 1,0077, et t la température de l'espace, cette relation est

$$a^t = 1{,}235\,\frac{2-b}{2-b'} - 0{,}489.$$

Pour b' les expériences solaires donnant 0,35, la relation devient $a^t = 1{,}008 - 0{,}748\,b$. Comme b ne peut être plus grand que 1, le minimum pour t est — 175. Les observations actinométriques donnent pour b, 0,8 au moins ; donc le maximum de t est — 115°.

la Terre, si elle était enveloppée d'une enceinte à pouvoir émissif maximum, dont les parois seraient maintenues à une température de 142° au-dessous de la glace fondante.

Cette quantité de chaleur que le chiffre de — 142° nous fait au premier abord considérer comme entièrement négligeable, que bien des gens seraient tentés de regarder comme moindre que rien, est-elle donc à dédaigner? On va voir de combien il s'en faut.

Il suffit pour cela de calculer l'effet total que produirait la chaleur de l'espace, si elle était tout entière employée à fondre de la glace. Or, en une année, la quantité de glace fondue ne serait pas inférieure à celle d'une couche qui envelopperait la Terre entière avec une épaisseur de 26 mètres. Dans le même temps, nous avons vu que la chaleur du Soleil fondrait une couche de glace de 31 mètres. Ainsi l'énergie du rayonnement stellaire atteint les cinq sixièmes de celle de la radiation soaire. « On sera étonné sans doute, dit Pouillet en rapportant ces nombres, que l'espace, avec la température de —142° au-dessous de 0, puisse donner à la Terre une quantité de chaleur si considérable, qu'elle se trouve presque égale à la chaleur moyenne que nous recevons du Soleil; ces résultats paraissent, au premier abord, tellement contraires à l'opinion que l'on se fait soit du froid de l'espace, soit de la puissance du Soleil, que l'on sera peut-être disposé à les regarder comme inadmissibles. Cependant il faut remarquer qu'à l'égard de la Terre le Soleil n'occupe que les 5 millionièmes de la voûte céleste, qu'il doit, par conséquent, envoyer deux cent mille fois plus de chaleur pour produire le même effet[1]. »

§ 4. CHALEUR ENVOYÉE A LA TERRE PAR LA LUNE.

La Lune exerce-t-elle sur la Terre une influence calorifique sensible? Cette question a été l'objet d'assez nombreux travaux,

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1838, t. II.

dont nous allons indiquer rapidement les résultats. D'après Zantedeschi, ce serait un savant italien, Montanari, qui aurait le premier, en 1685, reconnu l'influence calorifique lunaire, et un siècle plus tard, un autre Italien, Paolo Frisi, serait arrivé au même résultat ; ils employaient des lentilles et des miroirs pour concentrer les rayons de l'astre sur la boule d'un thermomètre. A la première de ces dates, les thermomètres étaient encore bien peu sensibles, et l'observation de Montanari ne peut guère inspirer de confiance. Presque à la même époque, Tschirnhausen, avec une lentille de 33 pouces de diamètre, assez puissante pour fondre des métaux par la concentration des rayons du Soleil, ne put trouver d'effet sensible à la radiation lunaire. En 1705, Lahire fils n'était pas plus heureux. « Il exposa, dit Lalande, le miroir concave de l'Observatoire qui a 35 pouces de diamètre aux rayons de la pleine lune, lorsqu'elle passait au méridien dans le mois d'octobre 1705, et il rassembla ces rayons dans un espace 306 fois plus petit que dans l'état naturel ; cependant cette lumière concentrée ne produisit pas le moindre effet sur le thermomètre de M. Amontons, qui était très sensible. »

Citons encore les expériences pareillement infructueuses de Péclet et Prevost, qui ont trouvé au contraire un abaissement de température ; de Forbes, qui opérait sur un thermomultiplicateur avec une lentille concentrant 6000 fois ; de Tyndall, qui attribue l'insuccès de ses tentatives à l'atmosphère instable de Londres.

La première expérience bien concluante sur cette question intéressante de physique céleste est de Melloni, et date de 1846. Elle mérite d'être reproduite dans ses détails, d'après le texte même de l'auteur, parce qu'on y verra clairement quelles précautions sont nécessaires, dans des observations aussi délicates, pour éviter les causes d'erreur dues à des phénomènes accidentels.

« Une lentille à échelons, de 1 mètre de diamètre, construite par M. Henri Lepaute, et destinée à l'observatoire météorolo-

gique du Vésuve, venait de m'arriver. Pour étudier sans danger l'ajustement des divers anneaux, ainsi que la distance et l'étendue du foyer, j'exposai cette magnifique pièce d'optique à un beau clair de lune, et j'amenai la lentille, par le double mouvement de rotation dont elle est susceptible, dans un plan exactement perpendiculaire à la direction des rayons. La



Fig. 167. — Melloni.

lumière qui tombait sur la surface de la lentille se concentra, à 1 mètre environ de distance, sur un espace circulaire de 1 centimètre de diamètre. Ce petit cercle, très brillant et assez nettement terminé, ayant une grandeur sensiblement égale à la section des tubes qui garnissent mes piles thermoscopiques, me suggéra l'idée d'essayer son action sur ces piles. Les préparatifs pour effectuer l'expérience furent aussitôt faits, et une

déviation considérable se développa sur le rhéomètre multiplicateur aussitôt que les rayons, pénétrant dans l'intérieur du tube, vinrent frapper la face extérieure de l'appareil. Étonné de la vivacité de cette action, et me doutant bien qu'elle ne dérivait pas de la chaleur lunaire, je plaçai la main à une certaine distance au-devant de l'ouverture, et l'index du rhéomètre retourna aussitôt au zéro, le dépassa, et prit une déviation contraire, preuve évidente que son mouvement primitif dérivait d'un rayonnement *frigorifique*, c'est-à-dire d'un abaissement de température dans la face de la pile exposée au foyer. L'origine de ce froid était facile à assigner. Comme la lentille se trouvait sur un balcon découvert et sous un ciel parfaitement pur, elle devait, à cause du grand pouvoir émissif du verre, rayonner sa chaleur en abondance vers l'espace et abaisser ainsi sa température au-dessous de celle de la pile, qui était enveloppée dans son étui métallique, et placée dans l'intérieur de l'appartement. Tant que la pile était abritée par le couvercle en métal, le faible rayonnement de celui-ci ne lui permettait pas de ressentir l'influence de ce froid de la lentille; mais aussitôt que le couvercle était abaissé, l'échange calorifique avait lieu entre les deux corps, et la pile, perdant plus qu'elle ne recevait, devait nécessairement abaisser la température de sa face découverte, et produire ainsi le courant électrique qui causait la déviation de l'aiguille du rhéomètre. Pour remédier à cet inconvénient, je transportai la lentille en dedans de la croisée qui donnait sur le balcon, je fis appliquer à la croisée une natte pouvant aisément se relever, afin de laisser entrer dans l'appartement les rayons lunaires, ou descendre pour les intercepter. Je tins la natte baissée jusqu'à ce que l'équilibre de température fût établi, et après m'être assuré qu'on n'obtenait aucune déviation au rhéomètre lorsqu'on abattait le couvercle de la pile, qui occupait toujours le foyer de la lentille, je fis arriver sur l'instrument la lumière de la lune; il se manifesta une déviation de quelques degrés du côté de la chaleur. Je répétai aus-

sitôt l'expérience, et, à ma grande surprise, la déviation eut lieu en sens contraire!...

« Quelques instants de réflexion suffirent pour me convaincre que ces changements de direction tenaient, selon toute probabilité, à des bouffées d'air extérieur qui entraient de temps en temps dans la chambre et se faisaient jour jusqu'à la face découverte du corps thermoscopique. On aurait pu aisément disposer les choses de manière que l'air ne pût trouver accès derrière la lentille; mais, guidé par la théorie de l'identité (de la chaleur et de la lumière), et l'expérience bien connue de Saussure relativement au thermomètre placé au fond d'une caisse vitrée, je crus qu'on parviendrait mieux au but en introduisant dans l'intérieur du tube deux diaphragmes de verre parfaitement diaphanes et bien polis sur leurs quatre faces, le premier à une petite distance de la pile, le second tout près de l'ouverture. Je montai donc de cette manière les tubes de ma pile, et, à la première occasion favorable, je refis l'expérience. L'index de l'appareil resta d'abord stationnaire pendant quelques instants, puis il commença à dévier lentement, et, après 4 à 5 minutes, il s'arrêta d'une manière stable sur un arc de 3°,7. Je retirai la pile du foyer et je la plaçai à côté, son ouverture toujours tournée vers le centre de la lentille; la déviation commença aussitôt à diminuer, et en quelques minutes l'index revint au zéro. Je répétai plusieurs fois la même opération, en retirant la pile tantôt de l'un, tantôt de l'autre côté, et toujours l'aiguille dévia étant au foyer, et retomba au zéro hors de cette position. Il va sans dire que le sens de cette déviation correspondait à celui de l'action calorifique.

« L'expérience était donc parfaitement nette et ne pouvait laisser l'ombre du doute. En effet, j'eus occasion de la répéter, plus tard, en présence de M. Belli, professeur de physique à l'Université de Pavie, de MM. Mossotti et Lavagna de l'Université de Pise, et de plusieurs autres savants distingués, qui tous sont sortis de mon cabinet intimement convaincus que la lumière de la Lune est calorifique.

« Lorsque je réfléchis que les physiciens qui tentèrent de découvrir la chaleur lunaire dans le courant du siècle dernier employèrent, d'après Lalande, des lentilles de 1 mètre et 1^{m},33 de diamètre, et le thermoscope extrêmement sensible d'Amontons, je soupçonne fortement que les résultats négatifs annoncés par ces physiciens tenaient, en grande partie, au froid engendré dans leurs lentilles par le rayonnement céleste réuni au refroidissement causé par les agitations de l'air extérieur auquel leurs instruments se trouvaient exposés; en sorte que je ne désespère pas du tout de rendre le phénomène apparent avec les thermoscopes à dilatation ordinaire[1]. »

Les expériences de Melloni ont été confirmées par celles de Zantedeschi, de Piazzi Smyth, de Lord Ross, et plus récemment par celles de MM. Marié-Davy et Baille. Zantedeschi (1848) concentrait les rayons lunaires sur une pile thermo-électrique à l'aide d'un miroir de 60 centimètres de diamètre et de 19 centimètres de distance focale. Les observations de Piazzi Smyth eurent lieu en 1856, au sommet du Pic de Ténériffe : ce savant recevait directement les rayons sur la pile dont la face était munie d'un cône de métal poli ; il compare l'effet obtenu au tiers de celui des rayons d'une bougie placée à 4^{m},75 de la pile. Lord Ross, opérant avec un réflecteur de trois pieds d'ouverture, conclut de ses résultats que la Lune rayonne comme une surface chauffée à 360° F. ou 182° C.

En 1868, M. Marié-Davy, employant d'abord un thermomètre différentiel à air, gradué de manière qu'une de ses divisions correspondît à 0°,0043, concentra les rayons lunaires sur l'une des boules, à l'aide d'une lentille d'environ 1 mètre d'ouverture, sans obtenir aucun effet appréciable. Substituant alors au thermomètre une pile thermo-électrique d'une grande sensibilité et à la lentille l'équatorial de 9 pouces de l'Observatoire de Paris, il obtint les indications suivantes :

1. Lettre de Melloni à Arago « *Sur la puissance calorifique de la Lune* », dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1846, t. I.

Dates.	Age de la Lune.	Déviation en degré.
9 octobre 1869.	4e jour	0°,00017
10 —	5e jour	0°,00013
12 —	7e jour	0°,00075
12 —	id.	0°,00029
17 —	12e jour	0°,00260
20 —	15e jour	0°,00287

Les effets calorifiques allaient en croissant, comme on voit, avec l'âge de la Lune. L'affaiblissement que marque la seconde observation du 12 octobre, vient de ce que la Lune était alors très voisine d'un horizon brumeux. Pour avoir l'effet direct de la radiation lunaire, il faut diviser les nombres de la troisième colonne par 247, qui est le pouvoir de concentration de l'équatorial calculé pour l'hypothèse où les 75 centièmes de la lumière tombée sur l'objectif arrivaient jusqu'à la pile. « La déviation obtenue le 20, dit M. Marié-Davy, correspondrait alors à 12 millionièmes de degré pour les rayons lumineux directs de la Lune. C'est à peu près la soixantième partie du résultat obtenu par M. Piazzi Smyth sur le pic de Ténériffe, et en opérant sur la totalité des rayons lunaires. » En faisant remarquer en outre, comme nous venons de le dire, que la chaleur lumineuse de la Lune croît rapidement avec la phase, M. Marié-Davy ajoute que la hauteur de l'astre et l'état du ciel, même sans nuage, influent beaucoup sur son intensité. Il a soin de distinguer entre la chaleur lumineuse de l'astre, qui comprend tous ceux des rayons solaires qui, après être tombés à la surface de la Lune, sont réfléchis par elle, et la chaleur obscure qui se compose de deux sortes de rayons obscurs : ceux qui proviennent de la radiation solaire, et ceux qui émanent directement de la surface échauffée du sol de la Lune. On sait en effet que la chaleur obscure est absorbée en beaucoup plus grande proportion que la chaleur lumineuse, dans leur trajet commun à travers les couches atmosphériques et les lentilles en verre de l'instrument. Piazzi Smyth observant sur le Ténériffe, c'est-à-dire à une altitude supérieure aux couches les plus absorbantes, et recevant directement sur sa

pile les rayons lunaires, échappait à cette double cause d'affaiblissement, ce qui explique les effets beaucoup plus considérables constatés par ce savant.

M. Baille a constaté une déviation sensible, due à l'action calorifique de la radiation lunaire, en concentrant les rayons au foyer d'un miroir concave de 39 centimètres d'ouverture. La pile thermo-électrique était reliée à un galvanomètre à réflexion très sensible. Ce physicien a calculé que, pour obtenir la même déviation en présentant à la pile un cube d'eau bouillante à face noircie, il fallait placer ce cube à une distance de 34 à 35 mètres. Il en conclut que la pleine lune à Paris, pendant les mois d'été, envoie sur le sol autant de chaleur qu'une surface noire à 100°, de même grandeur apparente que le disque de l'astre, et placée à 35 mètres de distance.

Ainsi les expériences de Melloni, de Smyth, de Lord Ross, de MM. Marié-Davy et Baille démontrent, sans doute possible, que l'action calorifique de la Lune est sensible à la surface de la Terre.

On ne sait au juste quelle est la nature des matériaux qui composent le sol lunaire. Mais, quelle qu'elle soit, il est probable qu'elle a quelque analogie avec celle des roches terrestres. Or il ne faut pas oublier que la Lune n'a pas d'atmosphère, ou, si elle en possède une, qu'elle est excessivement rare ; en tout cas, le ciel y est toujours d'une sérénité absolue, et ainsi la radiation solaire s'effectue à la surface de la Lune avec une extrême intensité. Même en supposant que le sol lunaire ait un grand pouvoir diffusif, son pouvoir absorbant doit déterminer en chaque point une élévation de température considérable, si l'on songe que les rayons du sol le frappent sans interruption pendant 350 heures dans chaque intervalle d'une lunaison. Sir John Herschel pensait que cette température était sans doute bien supérieure à celle de l'eau bouillante. D'après les calculs d'Harrison, c'est pendant le dernier quartier qu'elle atteint son maximum. Althaus, comparant la capacité de la Lune pour la chaleur à celle du quartz, estimait approximativement sa tem-

pérature à 840° F, ou à 449° centigrades, qui est la température de fusion du zinc. Si la chaleur ainsi accumulée, en raison de la nature de ses radiations, est peu sensible à la surface du sol sur la Terre, il reste à savoir si son absorption par notre atmosphère n'est pas de nature à modifier l'état du temps. C'est une question sur laquelle nous reviendrons en étudiant les phénomènes météorologiques.

Pour achever de passer en revue toutes les sources de chaleur d'origine cosmique, qui exercent ou peuvent exercer leur influence sur l'état thermique de notre globe, nous pourrions mentionner encore les planètes, les comètes, les bolides et les étoiles filantes. La difficulté qu'ont rencontrée les physiciens dans la constatation de l'effet que produisent les rayons calorifiques lunaires, suffit pour faire comprendre combien il serait chimérique de chercher à démêler la quantité de chaleur excessivement faible que réfléchissent vers nous les disques planétaires, dont les dimensions sont si petites et les distances à la Terre si grandes. Quant aux comètes, leur lumière paraît en partie déterminée par une incandescence propre à la matière dont leurs noyaux sont formés, et par conséquent il serait possible, au cas où leur mouvement les amènerait à une distance très petite de notre globe, que la température de la Terre s'en ressentît; mais, malgré tout ce qu'on a dit de leur influence à cet égard, aucun effet sensible n'a pu encore être constaté qu'on soit en droit d'attribuer à une action calorifique spéciale. Les étoiles filantes et les bolides sont dans un cas différent : ce sont des corps qui ne deviennent visibles qu'en pénétrant dans notre atmosphère; leur incandescence est due sans aucun doute à cette pénétration, et elles ne deviennent pour nous des sources de chaleur qu'à ce moment. Il est probable que, dans les grandes apparitions de ces météores, lorsque dans une même nuit elles se montrent par myriades, cette brusque production de chaleur dans les hautes régions de l'air est assez intense pour modifier la température atmosphérique. Mais nous ne

connaissons pas encore d'observation précise sur ce point de météorologie et de physique céleste.

On pourrait enfin mentionner encore, comme une source de chaleur propre à agir sur la température de la surface du globe, la chaleur intérieure qui lui est propre. On sait qu'à une certaine profondeur au-dessous du sol on trouve une couche dont la température constante est à peu près la moyenne température du lieu. Au-dessous de cette couche, la température est croissante, et son augmentation moyenne est d'environ 1° par 30 mètres. Si cet accroissement de chaleur, qu'on a vérifié jusqu'à une profondeur qui dépasse 700 mètres, continue dans les couches plus profondes et dans la même proportion, à 3 kilomètres on trouverait déjà la température de l'eau bouillante, et à 40 kilomètres la plupart des matières minérales connues auraient atteint leurs points de fusion. Mais il reste à savoir si la pression énorme que subissent les couches terrestres, à partir de cette dernière profondeur, n'est pas un obstacle à leur liquéfaction : l'incandescence du noyau terrestre reste ainsi à l'état d'hypothèse. Nous reviendrons plus loin sur ce problème d'un haut intérêt.

CHAPITRE XV

LES SOURCES DE CHALEUR

§ 1. CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LES COMBINAISONS CHIMIQUES. — LA COMBUSTION.

Le Soleil est la source de chaleur la plus abondante et la plus économique : mais ce n'est ni la plus commode, puisque nous ne pouvons en disposer à notre gré, et que c'est précisément quand elle fait défaut ou vient à s'affaiblir que nous avons le plus besoin de chaleur; ni la plus intense, puisque, à moins d'être concentrée à l'aide d'appareils dispendieux, elle ne produit que des températures relativement faibles. Aussi peut-on affirmer que la civilisation eût été impossible, si l'homme n'avait eu à sa disposition que la chaleur solaire, et n'avait trouvé, dans ce qu'on nomme les sources artificielles de chaleur, de quoi satisfaire aux plus indispensables besoins de son existence. C'est la combustion vive, c'est-à-dire la combinaison chimique de certains corps avec l'oxygène, qui constitue principalement les sources de ce genre, et le nom de sources artificielles vient de ce qu'on peut s'en servir à volonté, et régler leur intensité suivant les besoins du moment.

En général, toutes les fois que deux corps entrent en combinaison, de la chaleur se dégage. Ainsi, un mélange d'eau et d'acide sulfurique, d'eau et d'une certaine quantité de chaux vive, est accompagné d'une élévation de température assez considérable, pas assez grande toutefois pour produire de la

lumière. Le plus souvent, c'est la combinaison de l'oxygène, l'un des gaz constituants de l'air, avec certains corps simples, solides ou gazeux, qui, donnant lieu à un dégagement très intense de chaleur accompagné de lumière, détermine le phénomène de la combustion vive. Mais, pour qu'un corps combustible puisse brûler, soit à l'air libre, soit dans l'oxygène pur, il faut porter d'abord l'un de ses points à une température élevée; en un mot, il faut l'allumer. Une fois la combinaison commencée, la chaleur qu'elle dégage se communique de proche en proche, jusqu'à ce que le gaz comburant soit entièrement épuisé, ou que le corps avec lequel il se combine se trouve complètement consumé. C'est ainsi que nous obtenons le feu dans nos foyers, la lumière de nos bougies et de nos lampes; et nous savons par expérience que ces sources de chaleur et de lumière ne durent qu'autant qu'on les entretient, c'est-à-dire qu'on leur fournit les deux éléments de la combustion.

Le rôle de l'oxygène, dans la combustion à l'air libre, est aisé à constater par des expériences que chacun peut faire. Si l'on emplit d'eau le fond d'une assiette sur lequel repose une bougie allumée, et qu'on recouvre celle-ci d'une cloche dont les bords plongent dans le liquide, on observe bientôt une diminution d'éclat dans la flamme, qui finit par s'éteindre. Ce qui prouve bien que cette diminution d'éclat et l'extinction qui la termine sont dues à la disparition progressive de l'oxygène de l'air confiné de la cloche, c'est que le niveau de l'eau s'élève à l'intérieur au-dessus de celui de l'eau dans l'assiette, par l'effet de l'excès de pression de l'air extérieur sur l'air privé d'une partie de son oxygène. Le même phénomène se produit si la bougie allumée, ou tout autre corps en ignition, des charbons ardents par exemple, sont placés sous la cloche de la machine pneumatique. A mesure qu'on fait le vide, l'intensité de la flamme diminue; elle pâlit, puis s'éteint; les charbons noircissent et finissent de même par s'éteindre. Au contraire, la combustion est rendue plus active lorsqu'on renouvelle l'air au contact d'un corps en ignition, ce qu'on fait en soufflant

à sa surface à l'aide d'un soufflet, ou en activant le tirage dans la cheminée ou le fourneau qui le renferme.

Aussi, quand la combustion a lieu dans l'oxygène pur, est-elle beaucoup plus vive qu'à l'air libre : une bougie, une allumette éteintes, pourvu qu'il y reste la moindre parcelle incandescente, se rallument et brûlent avec vivacité, lorsqu'on les introduit dans une éprouvette pleine de ce gaz. En plongeant dans une cloche remplie d'oxygène une spirale d'acier portant un morceau d'amadou enflammé (fig. 168), on détermine une incandescence très vive du métal, qui projette dans tous les sens une multitude d'étincelles. La chaleur qui se dégage dans cette combinaison du fer et de l'oxygène, est si intense, que les parcelles incandescentes d'oxyde de fer qui en résultent et qui sont projetées ainsi que nous venons de le dire, s'incrustent dans les parois du vase de verre. Si l'on se rappelle que la température de la fusion du verre n'est que de 700° à 800°, tandis que celle de l'acier est comprise entre 1300° et 1400°, on ne sera plus étonné de la circonstance que nous rappelons ici.



Fig. 168. — Combustion du fer dans l'oxygène.

Le phénomène de la combustion est complexe, et l'aspect ainsi que la composition des diverses parties d'un gaz en ignition, ou, ce qui revient au même, d'une *flamme*, varient selon la nature du gaz : la flamme peut être plus ou moins lumineuse dans ses différentes parties et diversement colorée. Voici, à ce sujet, quelques détails intéressants que nous empruntons à un article du *Dictionnaire de chimie* de Wurtz :

« L'axe de la flamme est presque uniquement composé de gaz non brûlé et froid. Autour de cet axe, on rencontre des zones concentriques contenant des quantités de plus en plus grandes du gaz extérieur, qui est froid également; la tempéra-

ture des couches intermédiaires varie donc de façon à présenter un maximum. Varie-t-elle régulièrement? Dans la flamme des gaz simples, cela est très vraisemblable, mais elle varie par sauts plus ou moins brusques dans le cas des gaz ou des vapeurs complexes...

Fig. 169. — Structure de la flamme d'une bougie.

« Prenons comme exemple la flamme d'une bougie (fig. 169). La vapeur d'acide stéarique occupe le centre obscur de la flamme C; la température est peu élevée, car toute la chaleur fournie par l'enveloppe incandescente est absorbée par la volatilisation du combustible. On peut y introduire un grain de poudre sans qu'il prenne feu. Autour de ce noyau froid et non lumineux la combustion détermine une énorme élévation de température; l'acide stéarique subit alors les transformations pyrogénées qu'il subirait dans un tube chauffé au rouge blanc, il se forme une série de carbures très condensés et très peu hydrogénés jusqu'au carbone lui-même; en même temps il se produit de l'hydrogène et divers gaz, parmi lesquels on peut facilement déceler l'acétylène. Tous ces produits transitoires atteignent bientôt des zones où l'oxygène de l'air pénètre de plus en plus abondamment, ils brûlent partiellement en formant de l'oxyde de carbone, de l'acide carbonique et de l'eau, et se résolvent partiellement en carbone et hydrogène, qui subissent eux-mêmes la combustion. Le carbone est porté à l'incandescence au moment de sa séparation, A, et produit une vive lumière; l'hydrogène entoure la flamme lumineuse d'une gaine presque obscure, mais excessivement chaude. B. Frankland a prouvé que la présence du charbon incandescent dans la zone lumineuse n'est pas indispensable pour expliquer son



Fig. 170. — Coupe de la flamme d'une bougie.

éclat ; mais le dépôt de noir de fumée qui se forme à la surface des objets qu'on y plonge, et l'étude de toutes les réactions pyrogénées semblent prouver jusqu'à l'évidence la séparation réelle du charbon dans cette partie de la flamme. D'ailleurs, si l'on fait pénétrer dans la flamme peu lumineuse de l'alcool un gaz capable de provoquer un dépôt de charbon, un peu de chlore par exemple, celle-ci devient instantanément éclairante. On reconnaît aisément les diverses couches dont nous venons de parler dans la flamme d'une bougie ; il suffit pour cela de la couper en son milieu sur une toile métallique. Il existe à la base de la flamme une calotte d'un bleu pur D, dont nous n'avons pas tenu compte ; elle correspond à la réaction d'un excès d'air pur sur le gaz hydrocarboné. L'analyse spectrale y décèle la présence de la vapeur de carbone.



Fig. 171. — Expérience de Faraday.

« Faraday a imaginé une jolie expérience propre à démontrer la présence des gaz combustibles dans le noyau obscur de la flamme d'une bougie. Le bout d'un tube de verre recourbé comme l'indique la figure 171, d'un diamètre intérieur de 7 millimètres environ et assez mince pour ne pas se briser par la chaleur, est plongé dans la flamme : diverses substances qui sont volatilisées s'élèvent dans le tube, se refroidissent dans la branche descendante et tombent dans la fiole sous la forme d'un courant de fumées très denses, blanches et inflammables si l'orifice du tube est à quelques millimètres de la mèche. Elles sont noires, non inflammables et mêlées de charbon si l'orifice est plongé dans

la partie éclairante, et presque uniquement constituées d'acide stéarique s'il est en contact avec la mèche. »

D'après cette analyse des diverses parties qui composent une flamme complexe, telle que celle d'une bougie, on voit que la température, conséquence d'une activité plus ou moins grande de la combustion, doit varier considérablement selon la zone que l'on considère. Au centre du noyau obscur C, Murray a pu introduire une petite cuiller d'ivoire contenant quelques grains de poudre, sans que ceux-ci s'enflammassent : du phosphore s'y éteint; au contraire, en B, dans cette gaine presque obscure qui enveloppe extérieurement la flamme, la température est très élevée. On peut se servir, pour explorer la flamme, d'un fil de platine très fin; on voit qu'il reste obscur au centre, tandis qu'il rougit dans les régions les plus chaudes; l'éclat plus ou moins vif de son incandescence est une mesure relative de la température du point où il est plongé.

Si l'on souffle avec vivacité sur la flamme d'une bougie, tout le monde sait ce qui arrive : la bougie s'éteint. La raison du fait est très simple : par l'insufflation, on introduit de l'air froid dans le gaz inflammable, qui en outre se refroidit en se répandant dans une plus grande masse d'air. La température s'abaisse assez pour que la combustion cesse. Si, après avoir soufflé brusquement la flamme, la mèche est restée incandescente, en soufflant légèrement on la rallume, et cela se comprend encore : on renouvelle ainsi l'oxygène nécessaire à la combustion ; le gaz se dégage de nouveau, et s'enflamme au contact des parties solides incandescentes.

Revenons au phénomène général de la combustion.

On dit ordinairement que l'oxygène est le corps ou l'élément *comburant*, tandis que l'autre substance, celle avec laquelle il se combine avec dégagement de lumière et de chaleur, charbon, gaz de la houille, stéarine, etc., se nomme par opposition l'élément *combustible*. Cependant il est bien évident que cette distinction ne signifie rien au point de vue chimique. Comme le remarque M. G. Salet, « on peut dire également que l'oxygène

brûle dans l'hydrogène, lorsqu'on amène le premier de ces gaz par un tube dans un flacon plein d'hydrogène en l'enflammant à son entrée[1]. »

D'ailleurs l'oxygène n'est pas le seul corps qui joue le rôle décrit plus haut. Prenons un flacon rempli du gaz verdâtre qui constitue le chlore, et plongeons à l'intérieur un fragment de phosphore placé dans une petite capsule soutenue par un fil de fer. Le phosphore s'enflamme et il se dégage une fumée blanche qui n'est autre que le chlorure de phosphore résultant de la combinaison : la température à laquelle cette combinaison a lieu est d'ailleurs très élevée. Si l'on plonge une allumette enflammée dans un flacon qui contient un mélange de gaz hydrogène et de chlore, une explosion se produit. Enfin, l'arsenic et l'antimoine réduits en poudre prennent feu, si on les projette dans un flacon plein de chlore. Ainsi, dès qu'on met en jeu les affinités puissantes de ce gaz pour certains corps, il en résulte une combustion, c'est-à-dire un dégagement de lumière et de chaleur tout à fait semblable à celui qui résulte de la combustion ordinaire par l'action de l'oxygène.


Fig. 172. — Combustion du phosphore dans le chlore.

En général, pour que la combustion ait lieu, il faut que les éléments en présence, comburant et combustible, soient portés à une certaine température, ou, ce qui revient au même, qu'on en approche un corps qui ait lui-même la température d'inflammation. Mais, une fois qu'elle a commencé, la chaleur dégagée suffit en général pour porter les parties contiguës à cette même température, et la combustion se propage. La possibilité de cette propagation, la rapidité, l'énergie plus ou moins grande avec laquelle elle s'effectue, dépendent d'une

1. *Dictionnaire de chimie pure et appliquée* de Wurtz, article COMBUSTION.

série de conditions dont les principales sont : le pouvoir conducteur du corps combustible, sa chaleur spécifique, sa masse, sa forme, la pression du milieu ambiant, etc. Par exemple, un fil mince de magnésium brûle d'un bout à l'autre à l'air libre; il s'éteint d'autant plus rapidement que son diamètre est plus gros. L'anthracite est une sorte de houille qui brûle difficilement; les morceaux s'éteignent dès qu'ils sont isolés.

L'influence de la pression sur la combustion a été étudiée par Davy, puis par Frankland. Davy ayant comprimé de l'air de manière à réduire son volume au cinquième, y fit rougir à blanc un fil de fer au moyen de l'électricité; l'éclat de la combustion n'y fut pas plus grand que dans l'air ordinaire; un volume du mélange renfermait cependant autant d'oxygène qu'il y en avait dans un volume égal d'oxygène pur à la pression ordinaire. Frankland a trouvé, comme Davy, que la chaleur dégagée dans un temps donné par un corps en combustion, une bougie par exemple, est indépendante de la pression : cela résultait du fait que la bougie se consumait avec la même vitesse, quelle que fût la pression de l'air; mais, contrairement au résultat obtenu par Davy, il reconnut que l'éclat diminuait avec la pression. Tyndall raconte en ces termes une observation faite en 1859 par Frankland et qui montre bien quelle est l'influence de la pression sur la combustion : « Six bougies, dit-il, furent achetées à Chamounix, et soigneusement pesées; on les fit brûler pendant une heure dans l'hôtel de l'Union, et on détermina la perte de poids qu'elles avaient subie. Ces mêmes bougies furent portées au sommet du mont Blanc; et, dans la matinée du 21 août, on les fit brûler pendant une heure sous une tente qui les mettait parfaitement à l'abri de l'influence du vent. L'aspect des six flammes qu'elles donnaient à cette hauteur si grande nous surprit tous les deux. Elles semblaient n'être qu'un reflet éteint des flammes que les mêmes bougies donnaient dans la vallée de Chamounix. Pâles, petites, faibles, elles accusaient une énergie de combustion grandement diminuée. Nous pesâmes

les bougies avec soin à notre retour, et nous vîmes se révéler ce fait inattendu que la quantité de stéarine consumée en haut était presque la même que celle qui avait été consumée en bas. Ainsi, quoique le pouvoir éclairant de la flamme fût diminué dans une proportion extraordinaire, l'énergie de la combustion était restée la même. »

§ 2. PRODUCTION DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

La combustion est d'autant plus active et la température obtenue d'autant plus élevée, que la quantité d'oxygène fourni au combustible est plus grande en un temps donné. C'est ce qu'on sait depuis longtemps, et ce que la pratique industrielle a trouvé bien avant qu'on analysât le phénomène au double point de vue physique et chimique. De là l'emploi de ces puissantes machines soufflantes dans les hauts fourneaux et les forges, et celui du chalumeau dans les laboratoires. Entrons dans quelques détails sur ce dernier appareil, qui rend tant de services aux orfèvres et aux émailleurs, aux physiciens, aux chimistes, aux minéralogistes.

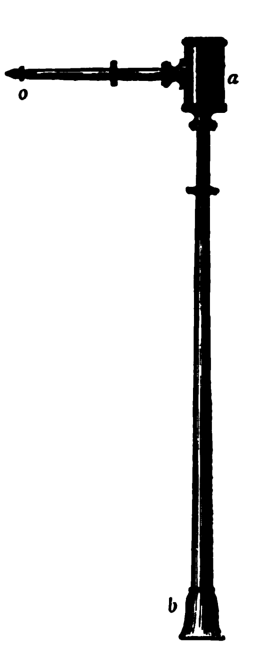


Fig. 173. — Chalumeau.

On donne aujourd'hui au chalumeau, dont l'inventeur, sans doute fort ancien, est inconnu, et qui a été introduit dans les laboratoires par les minéralogistes suédois du siècle dernier, la forme que représente la figure 173. C'est un tube légèrement conique, avec une embouchure *b* à son extrémité la plus large et une chambre à air *a*. Il se recourbe à angle droit et se termine par un bout effilé en platine *o*. Quand on souffle dans le tube avec la bouche, en contractant les muscles des joues pour éviter la fatigue qui

résulterait d'une pression par les muscles de la poitrine, l'air sort avec force et d'une manière continue par la petite ouverture *o*; et si l'on en dirige le courant sur la flamme d'une bougie, d'une lampe à huile ou à alcool, on déterminera un jet en forme de dard, comme le montrent les figures 174 et 175. Les émailleurs se servent, pour alimenter le courant, d'un soufflet à vent continu. On donne le nom de *lampe d'émailleur* à l'appareil ainsi constitué, et qui est employé pour travailler le verre.



Fig. 174. — Chalumeau; production d'une flamme oxydante.



Fig. 175. — Chalumeau; flamme réductrice.

Henri Sainte-Claire Deville s'est servi, pour obtenir des températures capables de fondre le chrome, la silice, le platine, d'un fourneau que représente la figure 176. Sur une cavité hémisphérique en fonte F

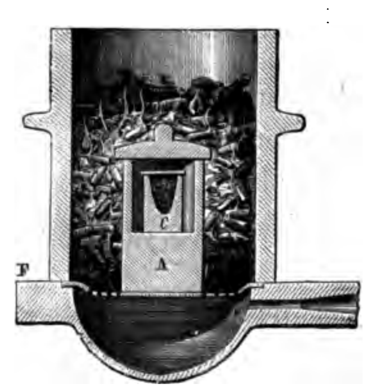


Fig. 176. — Fourneau de laboratoire de M. H. Sainte-Claire Deville.



Fig. 177. — Fourneau Forquignon et Leclercq.

repose une grille, ou disque en fonte percé de trous, et un manchon ou cylindre en terre réfractaire d'environ 12 centimètres de diamètre intérieur. Au centre de la grille on place un creuset en chaux non hydraulique A, à parois épaisses, renfermant intérieurement un second creuset rempli de la matière à fondre (par exemple de l'oxyde de chrome mélangé de charbon de sucre). On chauffe d'abord avec du charbon de bois; quand le double creuset a été amené au rouge, on remplit le fourneau d'escarbilles de houille bien dépouillées de mâchefer, et l'on active la combustion au moyen du soufflet de forge, dont on voit l'ouverture sur la droite du dessin. Au bout d'une heure de chauffe, la matière, si elle n'est pas plus réfractaire que le quartz ou le platine, est en fusion complète.

Le même savant physicien a fait, en collaboration avec M. H. Debray, d'importants travaux relatifs à la production des températures élevées, et ayant pour objet la fusion de masses considérables des métaux réfractaires, tels que le platine. Ils ont utilisé, dans ce but, la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène[1], et imaginé un appareil dont voici, d'après l'un des auteurs, la description et la figure :

« L'appareil qui va nous servir à fondre et à couler le platine, devant vous, comme un métal ordinaire, se compose de deux parties distinctes : le chalumeau destiné à produire la chaleur nécessaire à l'opération, et le four ou creuset qui doit contenir le métal soumis à la fusion.

« Le chalumeau est composé (fig. 178) d'un cylindre EEE′E′, de 12 millimètres de diamètre, en cuivre, terminé à sa partie inférieure par un ajutage en platine légèrement conique. Un tube de cuivre CC de 3 à 4 millimètres de diamètre intérieur et

1. On évaluait autrefois à 6800 et même à 8000° la température de combinaison de ces deux gaz. Mais, après la découverte des phénomènes de dissociation par H. Sainte-Claire Deville, ce savant reconnut que cette température devait être considérablement abaissée; il la fixa, avec M. Debray, à 2500° environ. D'autre part, Bunsen, en faisant combiner les deux gaz dans un eudiomètre très résistant, et en mesurant la pression maximum qui en résultait, fut amené à donner, pour cette température, le nombre 2800°, qui se rapproche beaucoup du précédent.

terminé par un bout de platine qui s'y ajuste à vis, pénètre dans le premier cylindre par sa partie supérieure et y est maintenu par une vis de pression P, qui permet, lorsqu'elle est desserrée, de donner au bout de platine la hauteur que l'on veut, par rapport à l'extrémité inférieure du cylindre EEE'E'.

« Ce cylindre porte latéralement une tubulure assez large, à laquelle est adapté un robinet H de *grande section*. Un robinet O termine également l'extrémité coudée du tube C. C'est par le robinet H que l'on fera arriver au moyen d'un tube de caoutchouc le gaz de l'éclairage servant de combustible ; c'est par le robinet O que sera introduit l'oxygène destiné à le brûler. L'extrémité inférieure du tube qui amène l'oxygène est percée d'un trou dont le diamètre varie de 2 à 3 millimètres, suivant les dimensions du four que l'on veut employer.

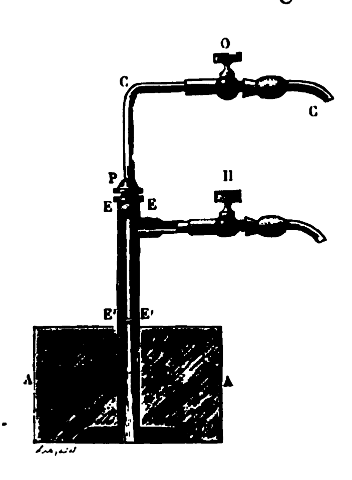


Fig. 178. — Chalumeau à gaz oxyhydrique.

« Le four où se fait la combustion se compose de deux parties : 1° La voûte AA formée d'un morceau de chaux rendue cylindrique au tour, et que l'on a légèrement cintrée à sa partie inférieure. Elle est en outre percée en son axe d'un trou légèrement conique par où pénètre le chalumeau et porte latéralement une rainure peu profonde. 2° D'une sole creusée dans un autre morceau de chaux également cylindrique : la cavité est une calotte sphérique dont la hauteur est à peu près les deux tiers du rayon du cercle de base. Sur le bord de cette calotte on pratique avec une râpe une rainure inclinée en dedans, qui correspondra à celle de la voûte. C'est par l'ouverture qu'elles forment par leur réunion que les produits de la combustion s'échapperont ; c'est également par là que le métal sera introduit pour être fondu et qu'il sera coulé. Enfin, et pour empêcher l'appareil de se briser pendant l'opération, la voûte et

le four sont entourés de fils de fer fortement serrés qui maintiendront les diverses parties de l'appareil, si le feu vient à les fissurer.

« Pour faire une fusion, on commence par ajuster la voûte sur le four de manière à faire correspondre les rainures, puis, tenant le chalumeau à la main, on ouvre le robinet H pour faire arriver un assez faible courant de gaz combustible que l'on enflamme; on ouvre le robinet O de manière à donner la quantité d'oxygène nécessaire pour le brûler. On fait alors plonger la flamme dans le trou de la voûte et l'on y fixe le bout du chalumeau. On chauffe lentement les parois du four, en augmentant peu à peu la vitesse du gaz, jusqu'à ce que l'on ait atteint le maximum de température; avec une lame de platine que l'on introduit par l'ouverture latérale et que l'on met dans le jet de gaz, on juge bientôt du point où la chaleur est la plus vive, c'est-à-dire du point où la fusion se fait le mieux. En abaissant ou élevant au besoin l'orifice du tube qui amène l'oxygène, on arrive à chauffer assez fortement le fond du four pour que le platine y reste fondu, tout en laissant le maximum de chaleur un peu au-dessus. On assujettit alors la vis et l'on introduit peu à peu le platine par l'ouverture latérale. Si le platine est en lames minces de moins de 1 millimètre d'épaisseur, on a à peine le temps de les introduire. On les voit disparaître presque aussitôt qu'elles entrent dans le four. L'oxygène doit arriver avec une certaine pression, de 4 à 5 centimètres de mercure environ, et peut alors imprimer au platine fondu

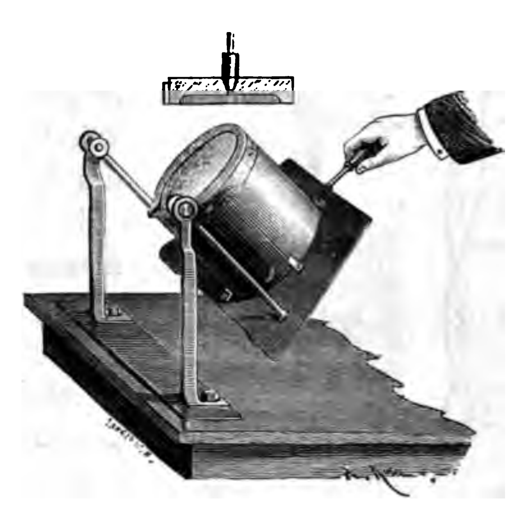


Fig. 179. — Procédé pour la coulée du platine en fusion.

un mouvement giratoire qui régularise la température dans toute sa masse, et qui facilite en même temps l'affinage[1]. »

En opérant ainsi, MM. Debray et H. Sainte-Claire Deville employaient, pour fondre un kilogramme de platine et le maintenir à l'état de fusion pendant toute la durée de l'affinage, 60 litres d'oxygène et 120 litres d'hydrogène. « Aussi le prix de revient d'une telle fusion est-il extrêmement minime, et d'après nos calculs elle ne dépasserait pas, si on en faisait une opération journalière, 20 ou 30 centimes par kilogramme, c'est-à-dire la millième partie de ce que coûte aujourd'hui la revivification du métal par les procédés de voie humide[2].

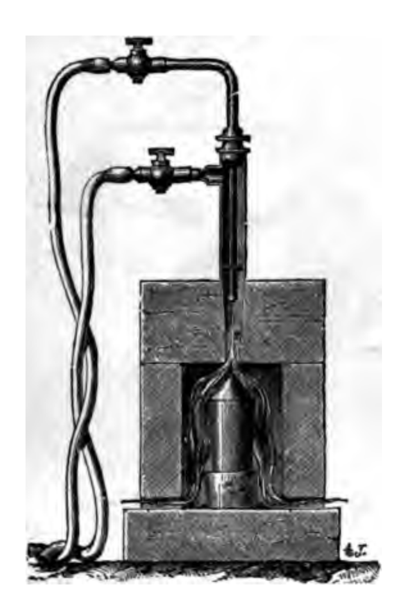


Fig. 180. — Fusion du platine; fourneau et chalumeau oxyhydrique de H. Sainte-Claire Deville.

Lorsqu'il s'agit de fondre des masses un peu considérables, on accouple, sur le même fourneau, un nombre plus ou moins grand de chalumeaux alimentés par le gaz oxyhydrique. La figure 181 montre un grand creuset tel que celui qui a servi, en 1874, à la fusion de 250 kilogrammes de platine iridié. Cette opération, la plus importante de toutes celles de ce genre qui avaient été jusqu'alors tentées, avait pour objet d'obtenir d'une même fonte un lingot d'un alliage de 90 pour 100 de platine et de 10 pour 100 d'iridium, de manière à assurer

1. H. Debray, *Leçons professées à la Société chimique de Paris*, 1861.

2. On comprendra aisément l'importance des nouveaux procédés de fusion du platine, quand on saura que le platine provenant des vases de chimie hors de service n'avait pas auparavant plus de valeur que le minerai lui-même. La dépréciation qui en résultait était telle, qu'un de ces vases qui servent à la concentration de l'acide sulfurique, et dont le prix monte à 80 000 francs lorsqu'il est neuf, n'était plus vendu que 50 ou 60 000 francs lorsqu'il était hors de service, ce qui arrive assez fréquemment. Le platine est malheureusement fort cher, à cause du peu d'abondance de son minerai. Le prix du kilogramme est de 900 à 1000 francs.

l'homogénéité de composition de toute la masse. Ce lingot, composé de 225 kilogrammes de platine et de 25 kilogrammes d'iridium, était destiné à fournir tous les nouveaux étalons métriques, mètres et kilogrammes, que la Commission internationale du mètre avait pour mission de faire confectionner pour les divers pays qui adoptent l'admirable système de mesures que la Convention nationale a substitué, il y a bientôt un siècle, aux anciennes mesures françaises. L'opération eut lieu au Conservatoire des Arts et Métiers, sous la direction de

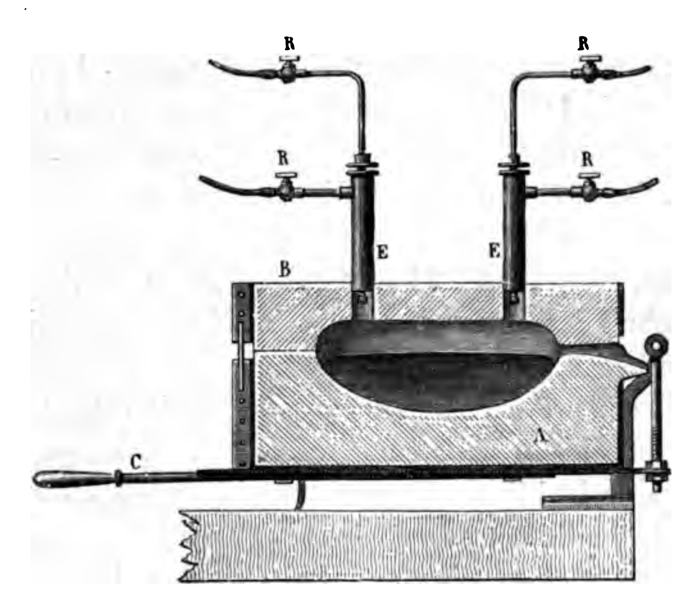


Fig. 181. — Creuset pour la fusion du platine à chalumeaux accouplés.

MM. Tresca, G. Tresca et Matthey de Londres et sous le contrôle de MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray. On fondit d'abord une série d'une vingtaine de petits lingots, du poids de 10 à 15 kilogrammes chacun, à l'aide d'un seul chalumeau. La quantité convenable d'iridium pulvérisé en petits grains avait été introduite en même temps que le platine, découpé en lames minces courbées en gouttière. Une seconde fusion de l'alliage ainsi obtenu se fit en trois fois, par lingots d'environ 83 kilogrammes chacun, ce qui exigea l'emploi simultané de trois chalumeaux. L'analyse de l'alliage, faite par M. Deville, ayant

indiqué un léger excès d'iridium, on le ramena aux proportions voulues par l'addition de 5 kilogrammes de platine pur, dans la troisième et dernière opération. Un creuset de grandes dimensions, en pierre de calcaire grossier, reçut les morceaux de platine iridié provenant des trois gros lingots de la seconde fusion, et le chauffage commença. Il se fit à l'aide de sept chalumeaux, qui pénétraient par autant d'ouvertures au travers du couvercle du creuset. Le gaz oxygène et le gaz hydrogène (gaz d'éclairage) arrivaient séparément dans deux sphères en cuivre, munies chacune de sept robinets, et d'où partaient les tubes en caoutchouc alimentant les chalumeaux. Un premier chargement de 110 kilogrammes fut fondu en 43 minutes. Au bout de 35 autres minutes, la fusion totale des 250 kilogrammes était terminée. Elle avait exigé une consommation de 31 mètres cubes d'oxygène et de 24 mètres cubes de gaz d'éclairage, ce qui fait 124 litres d'oxygène et 96 litres d'hydrogène par kilogramme de platine iridié fondu. Ainsi que le fit remarquer M. Tresca, ces consommations sont absolument conformes aux prévisions antérieures de MM. Deville et Debray.

Le lingot obtenu dans cette mémorable opération formait une barre de 1^m,140 de longueur, de 178 millimètres de largeur et de 80 millimètres d'épaisseur. Vu dans le creuset, alors qu'il était en pleine fusion, le métal était d'un blanc d'argent éblouissant, fluide comme du mercure et la surface était aussi réfléchissante que celle de ce liquide.

Les hautes températures dont nous venons de parler sont le résultat direct du dégagement de chaleur qui a lieu dans une combinaison chimique ; c'est ici celle de l'oxygène avec un gaz combustible, l'hydrogène. Dans la combustion à l'air libre, on rend l'action plus énergique et la chaleur plus intense, en augmentant la vitesse avec laquelle les courants gazeux se précipitent l'un sur l'autre. Mais la présence dans l'air d'un gaz inerte, l'azote, est un obstacle à l'énergie de la combinaison chimique et au développement de chaleur qui en est la conséquence. Cet obstacle ne peut être évité que si, comme dans les

appareils de Henri Sainte-Claire Deville, on met l'oxygène pur en contact direct avec l'hydrogène.

En décrivant l'arc voltaïque, nous avons mentionné les expériences qui prouvent combien est puissante cette source lumineuse et calorifique ; rappelons-nous en effet que les substances les plus réfractaires s'y fondent et s'y volatilisent. Récemment, un célèbre électricien, M. Siemens (de Londres), a utilisé l'arc voltaïque pour obtenir la fusion de morceaux d'acier placés à l'intérieur d'un creuset en graphite. Ce creuset était relié au pôle positif de deux machines dynamo-électriques associées en *quantité*. Le couvercle du creuset était percé d'un trou par où passait un cylindre de charbon formant le pôle négatif. Des dispositions spéciales maintenaient entre des limites convenables la résistance électrique du creuset, et servaient à régler la distance des pôles entre lesquels se produisait l'arc. Au bout de quatre minutes et demie, 1 kilogramme d'acier put être fondu par cette méthode, qui est probablement plus coûteuse que la fusion directe. Nous ne mentionnons ce moyen de production d'une température élevée que pour montrer que là ce sont encore les combinaisons chimiques qui déterminent la chaleur nécessaire à la fusion. En effet, le courant électrique producteur de l'arc voltaïque est engendré par le mouvement d'une machine qui tire elle-même sa puissance de la vapeur; et celle-ci est obtenue par la combustion d'une certaine quantité de houille, c'est-à-dire par une combinaison chimique.

§ 3. CHALEUR PRODUITE PAR LES ÊTRES VIVANTS. — CHALEUR ANIMALE.

Les êtres organisés sont, comme les corps bruts, assujettis aux lois qui règlent les échanges de chaleur par rayonnement ou par conductibilité; il n'y aurait rien à ajouter à ce que nous avons dit à cet égard, si, pendant toute la durée de leur *vie*, ils ne jouissaient en outre de la faculté de *produire de la chaleur*, s'ils n'étaient eux-mêmes les sources d'une chaleur qui

leur est propre et qui leur permet de se maintenir en dehors de l'équilibre de température avec le milieu liquide ou gazeux au sein duquel ils vivent. « Dans les conditions *normales* de leur développement et de leur existence, dit M. Gavarret, les êtres organisés ont et conservent une température supérieure à celle du milieu ambiant; l'observation la plus vulgaire le démontre pour les oiseaux et les mammifères. Il est nécessaire de recourir à des procédés d'investigation plus délicats, et surtout de se garantir avec soin de l'action réfrigérante de l'*évaporation* pour vérifier l'exactitude de cette proposition dans le reste du règne animal et dans toute l'étendue du règne végétal; mais le fait n'en est pas moins général et aujourd'hui incontestable. Lorsque, *exceptionnellement*, la température, autour d'eux, dépasse 40° à 45°, les êtres vivants résistent à l'échauffement et se maintiennent au-dessous de la température extérieure, pourvu toutefois que l'influence ne soit ni assez intense, ni assez prolongée pour compromettre définitivement leur existence[1]. »

Pour mesurer la température des êtres vivants dans les diverses parties de leur organisme, ainsi que pour en étudier les variations, les observateurs ont employé les appareils thermométriques les plus sensibles, thermomètres à mercure métastatiques, piles thermo-électriques, aiguilles et disques thermo-électriques. Nous avons décrit la plupart de ces instruments; nous allons dire les résultats obtenus, en commençant par ceux qui se rapportent à la température des animaux.

On peut les partager, sous ce rapport, en deux groupes principaux : le premier groupe comprend les oiseaux, qui, de tous les êtres organisés, sont ceux dont la température est la plus élevée, et les mammifères, au nombre desquels il faut distinguer l'homme; dans le second groupe viennent se ranger tous les autres animaux, reptiles, poissons, insectes, mollusques, etc., c'est-à-dire, au-dessous des mammifères, toute la

1. Gavarret, *De la chaleur produite par les êtres vivants.*

partie inférieure de l'échelle animale. Longtemps on a distingué les uns des autres les êtres de ces deux grands groupes, en donnant aux premiers le nom d'*animaux à sang chaud*, par opposition à celui d'*animaux à sang froid* qui caractérisait les autres. On croyait en effet que seuls les premiers possédaient une température qui leur fût propre, et que celle des autres se confondait avec celle du milieu ambiant. On n'avait pas encore réussi à constater la différence, faible à la vérité, mais non pas nulle, qui existe entre les deux températures extérieure et intérieure. Mais aujourd'hui il n'est pas douteux qu'il n'y a entre les animaux des deux groupes qu'une différence de degré, et dès lors les dénominations d'animaux à sang chaud et d'animaux à sang froid doivent être abandonnées.

Les recherches d'un grand nombre d'observateurs, parmi lesquels il faut citer Martine, Hunter, Davy au dernier siècle, Despretz, Prévost et Dumas dans celui-ci, ont prouvé que, à l'âge adulte et sous l'influence d'une alimentation normale, la température des oiseaux, mesurée au rectum, oscille entre 39°,5 et 44°. Chez des moineaux francs, Despretz a constaté 39°,08; chez des pigeons 42°,98; Pallas a trouvé 44°,03 pour divers petits oiseaux. D'un tableau comprenant la température d'un grand nombre de mammifères, nous relevons 35°,5 pour celle du singe, 40° pour le lapin, la chèvre, le mouton, le lamantin. Mais chez le même individu la température peut, selon les circonstances, varier de plus d'un degré centigrade.

La température du corps humain a été naturellement l'objet d'un grand nombre d'observations. M. Gavarret, en les rappelant dans l'ouvrage que nous avons cité, en conclut que, dans l'état physiologique ou normal, la température de l'homme adulte prise sous l'aisselle peut, dans nos climats tempérés, osciller entre 36°,5 et 37°,5.

Quand on parle de la température d'un animal, il importe de bien préciser l'endroit où elle a été prise; elle varie en effet suivant la partie du corps explorée. M. Becquerel a employé pour ces recherches les aiguilles thermo-électriques, qui ont

l'avantage de pouvoir être introduites dans les tissus sans les déchirer ni les désorganiser, ou dans les vaisseaux sanguins sans occasionner de trouble sensible dans la circulation. Il a ainsi reconnu que la température du sang, artériel ou veineux, va en croissant à mesure qu'on l'examine plus près du cœur. « Ainsi, dans la carotide, la température du sang est de 0°,15 au-dessus de celle du sang de l'artère crurale ; la température du sang de la veine jugulaire l'emporte de 0°,30 sur celle du sang de la veine crurale. » Mais « la température du sang artériel est toujours notablement supérieure à celle du sang veineux quand l'expérience porte sur des points correspondants de vaisseaux collatéraux. Ainsi, à l'origine de l'aorte, la température du sang l'emporte de 0°,84 sur celle du sang de la veine cave supérieure, au point où ce dernier vaisseau s'ouvre dans l'oreillette droite; la température du sang de l'artère crurale est moyennement supérieure de 0°,98 à celle du sang de la veine crurale. » Enfin « la température des muscles l'emporte considérablement sur celle du tissu cellulaire qui leur sert d'enveloppe[1] ».

De nombreuses influences font osciller en outre la température moyenne du corps des animaux supérieurs, entre de faibles limites à la vérité : l'âge, le sexe, l'état de veille ou de sommeil, de repos ou d'activité, de santé ou de maladie, les saisons, les climats sont autant de causes de variation, que nous ne faisons que signaler ici, parce que l'étude détaillée de ces éléments de la chaleur animale est plutôt du ressort de la physiologie que de la physique. Il est toutefois un trait caractéristique qu'il faut retenir : c'est que, chez les mammifères et les oiseaux, la température du corps est sensiblement indépendante des variations de température du milieu ambiant. L'influence de la saison, du climat, n'est pas assez grande pour contredire ce résultat général, que de nombreuses observations mettent d'ailleurs hors de doute. Les relations des voyageurs dans les

1. Gavarret, ouvrage cité.

régions polaires montrent que l'homme peut vivre dans une atmosphère à 70° au-dessous de zéro sans que la température de son corps subisse des changements notables. En ce qui regarde les animaux, M. Gavarret cite « les résultats obtenus par le capitaine Parry et le capitaine Back dans leurs voyages vers le pôle nord. Le premier a vu un renard conserver une température supérieure de 76°,7 à celle du milieu ambiant, et le second a constaté qu'un lagopède des saules l'emportait de 79°,1 sur la température de l'atmosphère. Ces faits paraîtront sans doute suffisants pour nous autoriser à considérer les mammifères et les oiseaux, comme des animaux à *température physiologiquement constante.* »

Des observations non moins nombreuses prouvent que les animaux supérieurs peuvent supporter sans périr des températures excessives, c'est-à-dire dépassant beaucoup quelquefois 40° à 45° centigrades. Le corps humain jouit de la même faculté. Depuis le fait rapporté en 1763 à l'Académie des sciences par Tillet, de trois jeunes filles, attachées au service du four banal de Larochefoucault, pouvant rester *cinq* et même *dix* minutes dans l'intérieur de ce four, quoiqu'il fût encore assez chaud, et supportant ainsi sans accidents une température d'au moins 132 degrés centigrades, de nombreuses expériences du même genre ont été faites sur l'homme et sur les animaux. La faculté de résister à des températures très élevées sans que la température propre du corps soit elle-même élevée d'une manière sensible est donc incontestable. La résistance au refroidissement est rendue possible par la surexcitation des causes qui produisent la chaleur, tandis que la résistance aux causes extérieures d'échauffement provient de la transpiration abondante, de l'évaporation et du froid qu'elle détermine à la surface du corps.

Les mêmes phénomènes ont été observés chez les animaux inférieurs dont la température, comme on va voir, est notablement plus faible que celle des oiseaux et des mammifères. Longtemps on a cru que les animaux dits *à sang froid* n'a-

vaient point de chaleur propre, ou que celle de leur corps était la température du milieu où ils sont habituellement plongés. Cela tenait à la faible différence qui existe, en effet, entre ces deux températures, à l'insuffisance des moyens d'observation, et surtout enfin à l'action réfrigérante de l'évaporation, qui masquait le faible excès de la température de l'animal sur celle du milieu ambiant. Les instruments thermo-électriques, piles et aiguilles, ont permis de surmonter ces difficultés, et des observateurs comme Nobili et Melloni, Becquerel et Dutrochet, parvinrent à mesurer cet excès avec une précision qui mit fin à tous les doutes. Citons seulement quelques résultats :

Noms des animaux.	Excès de leur température sur le milieu ambiant.
REPTILES :	
Grenouille	0°,50 à 0°,75
Crapaud	0°,50 à 0°,75
Lézard	0°,75 à 1°,25
Couleuvre	0°,75 à 1°,35
Boa	2°,50
Tortue	1°,22 à 3°,90
Vipère	5°,56
POISSONS :	
Brochet	5°,88
Carpe	0°,86 à 0°,93
Anguille	0°,93
Truite	1°,10
Requin	1°,30
ARTICULÉS, MOLLUSQUES, ETC. :	
Scarabée	0°,25 à 0°,70
Grillon	5°,80
Guêpe	0°,50
Hanneton	0°,25 à 1°,77
Cétoine dorée	0°,25
Escargot	0°,90
Limace	0°,25 à 1°,11
Holothurie tubuleuse	0°,20 à 0°,60

En résumé, tous les animaux, dans l'état de vie, produisent de la chaleur. Les uns, les animaux supérieurs jouissent de la faculté de maintenir leur température sensiblement constante, quelles que soient les circonstances extérieures. Les animaux

inférieurs paraissent au contraire subir l'influence décisive de la température du milieu ambiant[1], tout en possédant toujours un excès de température qui démontre la production d'une chaleur propre à leurs organes. Du reste, cette production de chaleur est d'autant plus considérable dans toute l'étendue de l'échelle animale que l'organisation est plus complexe et les fonctions plus développées.

Il nous reste à dire maintenant à quelles causes on doit attribuer cette production, ou quelle est la nature de la source de la chaleur chez les animaux.

A la doctrine des anciens, qui admettaient que la chaleur animale est *innée* et que son siège est dans le cœur (dans le ventricule droit selon Aristote, dans le ventricule gauche selon Galien), succédèrent les explications de Van Helmont, puis de Hales. La première rapportait justement la calorification chez les animaux supérieurs et chez l'homme à des réactions chimiques; mais la science était encore alors trop peu avancée pour pouvoir préciser la nature de ces réactions; Van Helmont indiquait le mélange, dans le cœur, du soufre et du sel volatil du sang; Sylvius la rapportait à l'effervescence née au contact de la lymphe et du chyle. Les iatro-mécaniciens, tels que Hales, attribuaient la chaleur animale au frottement; c'est dans le poumon, où la vitesse du sang est plus considérable que partout ailleurs, qu'était le siège principal de ce dégagement, et son élément actif était le globule.

1. « Les animaux inférieurs sont si profondément influencés par l'état physique du milieu qui les environne, que leur mode d'existence dépend complètement des circonstances extérieures. Dans la belle saison, ils sont vifs, agiles, jouissent de la plénitude de la vie; aux approches de l'hiver, ils commencent à languir, et, si le froid augmente autour d'eux, ils tombent dans un état d'engourdissement tel, que tous les actes de la vie semblent momentanément suspendus. La production de chaleur devient alors très faible, et, sans s'abaisser *au-dessous* de celle des corps environnants, leur température s'en approche d'autant plus que leur torpeur est plus prononcée. Sous peine de s'exposer à des erreurs graves, il est donc nécessaire, quand on veut étudier la *température propre* de ces animaux, d'opérer dans des circonstances telles que leurs fonctions soient dans la plénitude de leur exercice. C'est généralement quand le milieu ambiant se maintient entre 12° et 25° que les observations donnent des résultats satisfaisants. » (Gavarret, *De la chaleur produite par les êtres vivants*.)

Les travaux de Priestley, surtout ceux de Lavoisier, à l'époque où la chimie se constituait sur des bases positives, conduisirent à la véritable solution du problème. Depuis 1789, date de la publication du *Mémoire sur la respiration des animaux*, des recherches considérables ont été faites sur le même sujet, les données du problème des causes de la chaleur animale ont été obtenues avec une précision plus grande, mais les conclusions de notre grand chimiste restent intactes. Nous allons les reproduire.

« En partant des connaissances acquises, disait Lavoisier, et en nous réduisant à des idées simples que chacun puisse aisément saisir, nous dirons d'abord, en général, que la respiration n'est qu'une combustion lente de carbone et d'hydrogène, qui est semblable en tout à celle qui s'opère dans une lampe ou dans une bougie allumée, et que, sous ce point de vue, les animaux qui respirent sont de véritables corps combustibles qui brûlent et se consument.

« Dans la respiration, comme dans la combustion, c'est l'air de l'atmosphère qui fournit l'oxygène et le calorique ; mais, comme dans la respiration, c'est la substance même de l'animal, c'est le sang qui fournit le combustible, si les animaux ne réparaient pas habituellement par les aliments ce qu'ils perdent par la respiration, l'huile manquerait bientôt à la lampe, et l'animal périrait, comme une lampe s'éteint lorsqu'elle manque de nourriture.

« Les preuves de cette identité d'effets entre la respiration et la combustion se déduisent immédiatement de l'expérience. En effet, l'air qui a servi à la respiration ne contient plus, à la sortie du poumon, la même quantité d'oxygène ; il renferme non seulement du gaz acide carbonique, mais encore beaucoup plus d'eau qu'il n'en contenait avant l'inspiration. Or, comme l'air vital ne peut se convertir en acide carbonique que par une addition de carbone ; qu'il ne peut se convertir en eau que par une addition d'hydrogène ; que cette double combinaison ne peut s'opérer sans que l'air vital perde une partie de son calo-

rique spécifique, il en résulte que l'effet de la respiration est d'extraire du sang une portion de carbone et d'hydrogène, et d'y déposer à la place une portion de son calorique spécifique, qui, pendant la circulation, se distribue avec le sang dans toutes les parties de l'économie animale, et entretient cette température à peu près constante qu'on observe dans tous les animaux qui respirent.

« On dirait que cette analogie qui existe entre la combustion et la respiration n'avait point échappé aux poètes, ou plutôt aux philosophes de l'antiquité, dont ils étaient les interprètes et les organes. Ce feu dérobé du ciel, ce flambeau de Prométhée, ne présente pas seulement une idée ingénieuse et poétique, c'est la peinture fidèle des opérations de la nature, du moins pour les animaux qui respirent : on peut donc dire, avec les anciens, que le flambeau de la vie s'allume au moment où l'enfant respire pour la première fois, et qu'il ne s'éteint qu'à sa mort[1]. »

Après avoir remarqué que l'homme, plus favorisé par la nature qu'aucun autre animal, a une constitution qui lui permet de vivre dans toutes les températures et sous tous les climats, de mener, selon ses besoins et sa volonté, une vie active ou une vie tranquille, la circulation, la respiration et la nutrition, s'activant ou se ralentissant, se réglant en un mot sur les circonstances, Lavoisier ajoute : « En rapprochant ces réflexions des résultats qui les ont précédées, on voit que la machine animale est principalement gouvernée par trois régulateurs principaux : la respiration, qui consomme de l'hydrogène et du carbone et qui fournit du calorique ; la transpiration, qui augmente ou qui diminue, suivant qu'il est nécessaire d'emporter plus ou moins de calorique ; enfin la digestion, qui rend au sang ce qu'il perd par la respiration et la transpiration. »

Nous avons dit qu'un grand nombre de savants ont appro-

1. *Premier mémoire sur la respiration des animaux*, par Seguin et Lavoisier, t. II des Œuvres complètes.

fondi, depuis Lavoisier, par des observations et des expériences multipliées, la question de la source de la chaleur animale. Les phénomènes physico-chimiques de la respiration, de la nutrition, la détermination numérique des quantités de carbone et d'hydrogène brûlées, la mesure à l'aide des procédés calorimétriques de la chaleur produite, l'influence de l'alimentation sur l'intensité des combustions respiratoires et par suite sur la température des animaux, selon la nature ou la quantité des matières alimentaires ingérées, l'étude des phénomènes qu'on observe lorsque l'animal, privé de nourriture, mais continuant à absorber de l'oxygène, est réduit à brûler les matériaux de ses propres organes, graisse, sang, tissus, tous ces problèmes et bien d'autres ont été abordés et en grande partie résolus ; mais il reste encore nombre de points obscurs dont la solution dépend à la fois de la physique et de la physiologie. Ne pouvant entrer dans les détails que nécessiterait l'exposé même sommaire des découvertes faites sur ces divers points de la science, nous nous bornerons à montrer, par un exemple, comment on a procédé à la détermination de la part qui revient à la respiration dans la production de la chaleur animale.

La méthode consiste 1° à mesurer la quantité de chaleur perdue par un animal en un temps donné ; 2° à calculer la chaleur produite, en déduisant, de la quantité d'oxygène absorbé et de l'analyse des gaz expirés, la proportion de carbone et d'hydrogène transformés en acide carbonique et en eau, et en multipliant le poids de chacun de ces deux corps brûlés, par sa chaleur de combustion.

Voici (fig. 182) l'appareil qui a servi à Dulong pour ces déterminations. Il se compose de deux boîtes concentriques en fer-blanc, l'une et l'autre à parois très minces, et tenues à distance par de légers supports. La boîte intérieure constitue l'enceinte destinée à contenir l'animal en expérience, qu'on a préalablement placé dans une cage en osier. Cette enceinte communique avec l'extérieur par deux tubes ou colonnes de fer-blanc, dont l'une est en relation avec un gazomètre plein d'air ; et l'autre

avec un gazomètre rempli d'eau. La première colonne s'ouvre directement dans la boîte intérieure et amène incessamment de l'air nouveau pour l'entretien de la respiration de l'animal. La seconde est terminée inférieurement par un serpentin dont l'ouverture débouche à droite de la boîte; c'est par elle que sortent les gaz expirés, de sorte que, grâce au jeu des gazomètres, un courant d'air est entretenu autour de l'animal d'une manière continue. L'eau de l'appareil est agitée de manière à répartir uniformément la chaleur cédée par l'animal et par les gaz qui circulent dans le serpentin. Un thermomètre mesure la température de l'eau au commencement et à la fin ou dans les diverses phases de l'expérience.



Fig. 182. — Appareil de Dulong pour la mesure de la chaleur développée dans l'acte de la respiration.

L'appareil n'est autre chose, comme on voit, qu'un calorimètre, disposé de façon que l'animal, vivant dans un air constamment renouvelé, puisse respirer dans des conditions normales. L'air fourni avait été préalablement analysé; une autre analyse donnait la composition des gaz expirés; les volumes et les températures de l'air et des gaz en question étaient jaugés et mesurés, le poids en eau du calorimètre et sa température étaient pareillement connus ou déterminés. En procédant ainsi, Dulong pouvait donc calculer : 1° la chaleur cédée par l'animal au calorimètre dans un temps donné; 2° la quantité totale de l'oxygène absorbé par l'animal dans le même temps; 3° la quantité d'acide carbonique exhalée. D'après les principes adoptés par ce physicien et qui n'étaient autres que ceux formulés par Lavoisier, ces données étaient suffisantes pour calculer les quantités de carbone et d'hydrogène brûlées par l'animal, lesquelles multipliées par leurs chaleurs de com-

bustion donnaient la quantité totale de chaleur développée par la respiration de l'animal[1].

Dans la méthode Dulong et Petit, l'acide carbonique exhalé était partiellement absorbé par l'eau du gazomètre, de sorte que le dosage ne pouvait se faire avec toute l'exactitude désirable. Cet inconvénient n'existe plus dans le procédé imaginé par Regnault et Reiset, et les déterminations de ces deux savants relatives aux données de la respiration animale sont aussi rigoureuses que possible. La figure 183 représente l'appareil qu'ils ont employé pour cet objet. On voit que l'animal est introduit sous une cloche de verre tubulée qu'enveloppe un manchon de verre de plus grande dimension porté sur le même disque que la cloche. Le manchon était rempli d'eau maintenu à une température constante. Voici maintenant par quelle disposition l'air de la cloche, malgré l'absorption d'oxygène due à la respiration de l'animal, d'une part conservait une composition constante, d'autre part cédait l'acide carbonique exhalé. On voit sur la droite du dessin un système de deux pipettes communiquant l'une avec l'autre par un tube de caoutchouc vulcanisé, et formant ainsi deux vases communicants. L'une et l'autre sont à moitié pleines de potasse caustique, et le liquide a par conséquent dans chacune un même niveau. A l'aide d'un mécanisme à balancier, les pipettes étaient mues

1. Despretz est arrivé aux mêmes résultats par une méthode à peu près pareille. Mais depuis la même question a été reprise par Regnault et Reiset, à l'aide d'appareils perfectionnés et de méthodes plus précises, permettant d'éviter diverses causes d'erreur. Voici, d'après M. Gavarret, les principaux résultats de ces dernières et importantes expériences :

« 1° Tous les animaux absorbent de l'oxygène, qui se combine avec les matériaux du sang. La quantité d'oxygène absorbée varie avec la classe et l'espèce zoologique, et, pour le même animal, avec les circonstances physiologiques.

« 2° Tous les animaux exhalent de l'acide carbonique; sauf quelques cas exceptionnels et très importants, le poids de l'oxygène de l'acide carbonique exhalé est plus *faible* que celui de l'oxygène absorbé. L'oxygène absorbé étant tout entier éliminé sous forme d'eau et d'acide carbonique, la portion de ce gaz qui ne se combine pas avec le carbone, s'unit à l'hydrogène du sang ; de sorte que la somme des quantités d'oxygène combinées avec le carbone et l'hydrogène représente toujours la totalité de l'oxygène absorbé par les surfaces respiratoires.

« 3° Dans l'état de santé et soumis à leur régime habituel, les mammifères et les oiseaux exhalent *constamment* de l'azote. L'exhalation de ce gaz est toujours très faible (moindre ordinairement qu'*un centième* du poids de l'oxygène absorbé). »

verticalement, l'une s'élevant pendant que l'autre s'abaissait. Par ce mouvement alternatif, le liquide de la pipette qui s'élevait, s'écoulait et passait dans l'autre ; il y était remplacé par l'air de la cloche à l'aide d'un tube mettant en communication chaque pipette avec la cloche elle-même. Cet air, au contact de la potasse caustique, se dépouillait de son acide carbonique, puis rentrait dans la cloche au moment où la pipette s'abaissait de nouveau, et ainsi de suite.

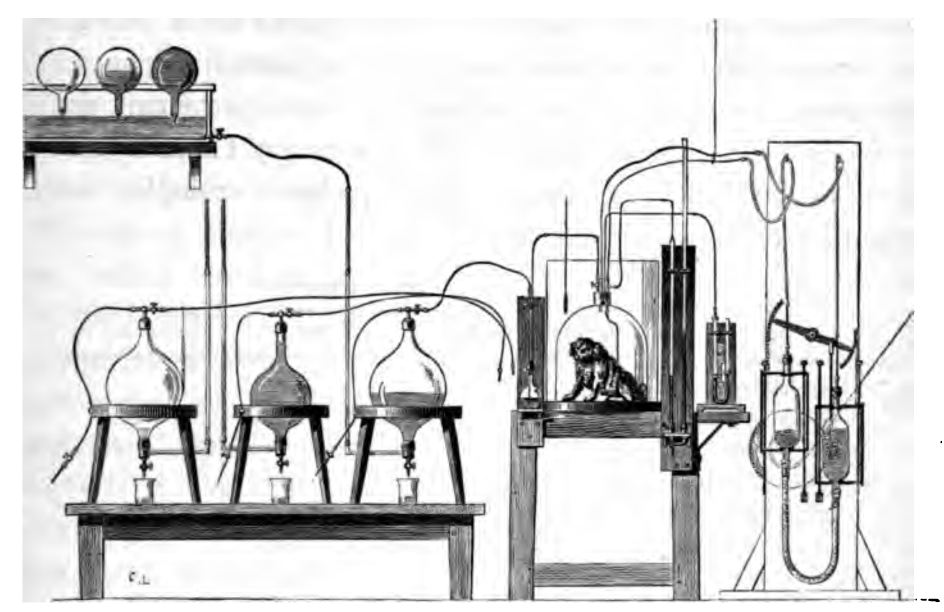


Fig. 183. — Appareil de Regnault et Reiset pour l'étude de la respiration des animaux.

L'air respiré par l'animal, perdant de la sorte la quantité d'oxygène absorbée par la respiration et transformée en acide carbonique, sa tension diminuait incessamment à mesure que sa composition changeait. Il fallait remplacer cet oxygène, et c'est à quoi servait la partie de l'appareil qu'on voit à gauche du dessin. De grands ballons préalablement remplis de chlorure de calcium recevaient par leur tubulure supérieure de l'oxygène pur, pendant que le chlorure s'écoulait par une tubulure inférieure. Ils étaient en communication avec un flacon laveur contenant une solution de potasse, et c'est bulle par bulle que l'oxygène, après avoir barbotté dans cette solution,

passait sous la cloche renfermant l'animal en expérience. C'est par la différence de pression de l'oxygène des ballons et de l'air de la cloche que se faisait cet écoulement de gaz.

Ainsi, l'animal respirait dans un air ayant une composition et une température constantes, et l'acide carbonique exhalé était recueilli, de sorte que l'on pouvait évaluer rigoureusement la quantité d'oxygène consommée ainsi que celle de l'acide carbonique fourni par la respiration. D'un autre côté, l'acide carbonique seul ayant disparu de l'atmosphère de la cloche, on pouvait analyser et doser les gaz que la potasse ne pouvait absorber, azote, hydrogène carboné ou libre, provenant des voies respiratoires ou digestives et versées par l'animal pendant la durée de l'expérience. Voici quelques exemples des résultats obtenus par cette méthode :

Animaux.	Acide carbonique exhalé par heure.	Oxygène consommé par heure.	Oxygène consommé par heure et par kilogr.	Rapport de l'oxygène contenu dans CO^2 à l'oxygène absorbé.
	gr.	gr.	gr.	
Chien nourri à la viande (poids, 6k,393). . . .	7,590	7,449	1,164	0,742
Poule nourrie à l'avoine (poids, 1k,610). . . .	2,520	1,775	1,109	1,024
5 grenouilles (poids, 287 grammes). . . .	0,0182	0,0181	0,063	0,729
40 hannetons (poids, 40 grammes)	0,0472	0,0434	1,076	0,791

Les résultats suivants concernant la respiration humaine sont dus à MM. Andral et Gavarret :

Ages des individus.	Poids.	Carbone brûlé en 24 heures.	Acide carbonique exhalé en 24 heures.	Carbone brûlé par kilogr.
	k.	gr.	gr.	gr.
8 ans.	22,25	120,8	442,9	5,4
16 ans.	53,39	259,2	950,4	4,8
40 à 60 ans . . .	68,8 à 65,5	247,4	888,8	3,6
60 à 80 ans . . .	65,5 à 61,2	229,8	809,6	3,4

Pour résumer ce paragraphe, on voit que la chaleur animale est due tout entière à des combustions : l'oxygène de l'air ambiant est l'élément comburant ; les matériaux organiques versés par la digestion en sont l'élément combustible. C'est donc à

des combinaisons chimiques qu'un animal quelconque doit toute la chaleur dont il a besoin pour maintenir la température nécessaire à son existence.

§ 4. CHALEUR PRODUITE PAR LES VÉGÉTAUX.

C'est dans l'acte de la germination qu'on a constaté le plus anciennement la production de chaleur chez les végétaux. On sait que les brasseurs, pour la préparation du *malt*, font subir aux grains d'orge, préalablement imbibés d'eau et déposés en couches plus ou moins épaisses sur le sol bitumé de salles nommées *germoirs*, un commencement de germination. Pendant cette opération, les tas de grains s'échauffent spontanément, et la chaleur est d'autant plus forte que la germination est plus rapide. Le même phénomène a été étudié par Gœppert sur les graines de divers végétaux, blé, avoine, maïs, pois et chanvre, etc. En s'en tenant à la première phase de la germination, afin d'éviter la cause d'erreur provenant de la moisissure, ce savant constata les excès suivants de température des graines sur l'atmosphère : 11°,25 à 12°,50 pour le blé et l'avoine, 6°,25 à 7°,50 pour le maïs, 7°,5 à 8°,5



Fig. 184. — *Arum maculatum.*

pour les pois et les grains de chènevis, 17°.5 pour la graine de trèfle.

C'est à notre grand naturaliste Lamarck qu'on doit la première étude sur la production de la chaleur pendant la floraison. Dès 1777, il constata l'échauffement notable que présentent les spadices de l'*Arum italicum*, ou Gouet d'Italie, au moment de l'épanouissement de la spathe ou de la déhiscence des anthères. Des phénomènes semblables furent observés par divers savants sur diverses plantes de la famille des Aroïdées : les noms de Sennebier, de Th. de Saussure, de Hubert, de Vrolick, de Vriese, de Dutrochet et de beaucoup d'autres observateurs sont attachés à ces recherches de physiologie et de physique végétales. L'excès de température du spadice sur l'air environnant peut atteindre et dépasser 10 degrés. M. Emery, dans son bel ouvrage LA VIE VÉGÉTALE, cite à ce sujet une observation curieuse due à Hubert, planteur de La Réunion. « La mère d'Hubert, dit-il, était aveugle. Un jour, se promenant dans le jardin, des fleurs la surprirent et l'attirèrent par la suavité de leur parfum ; elle les toucha, selon la constante habitude des personnes affligées de cette cruelle infirmité, et fut fort étonnée d'éprouver une sensation de chaleur très marquée. Elle apporta aussitôt la plante à son fils, qui reconnut en elle un *Arum*, et lui fit part de sa découverte. Hubert, séduit par la nouveauté du phénomène, l'étudia avec soin, multiplia et varia les conditions de l'expérience. Une fois, il vit la température d'un thermomètre placé au milieu de cinq spadices liés ensemble s'élever à 44°, alors que l'air restait à 19° : l'influence de douze spadices réunis de la même manière la fit même monter à 49°,5, soit une surélévation de 30°,5 ! Des Philodendrons, autres espèces de la même famille, ont fourni, avec un seul spadice, des élévations de température de 15 à 18 degrés. »

Théodore de Saussure a constaté, au moment de l'épanouissement des fleurs de divers végétaux, un excès de température s'élevant à 1° dans les fleurs mâles du *Potiron*, à 0°,5 dans les

fleurs hermaphrodites du ***bignonia de Virginie***, de 0°,3 dans les petites fleurs de la ***Tubéreuse des jardins***. » Mais de toutes les fleurs, celles de la Reine des Eaux, la ***Victoria Regia***, aux étamines innombrables, aux dimensions inusitées, puisque leur diamètre — bien que notablement réduit par la captivité



Fig. 185. — Fleurs de la *Victoria Regia*.

— atteint encore trois décimètres dans nos serres, devaient fournir les nombres les plus élevés. Et, en effet, la température de l'une d'elles, née au jardin botanique de Hambourg, s'élevait au moment de l'épanouissement à 40°,5 centigr., alors que l'eau de l'aquarium était seulement à 20°,8 centigr., et l'atmosphère de la serre à 28°,5 centigr. D'autres fleurs, moins

grandes il est vrai, éprouvent à la même époque un échauffement encore très sensible; ainsi, chez le Magnolia à grandes fleurs, il est de 3 à 4 degrés[1]. »

Les observations de Dutrochet sur les spadices des aroïdées lui ont fait reconnaître, dans l'échauffement de ces organes, une périodicité quotidienne : ce sont comme les paroxysmes d'une fièvre, qui atteignent leur maximum dans la journée et leur minimum dans la nuit, et reviennent à la même heure pour une même plante, à des heures diverses pour des plantes différentes.

Mais si les plantes produisent de la chaleur pendant les périodes d'ailleurs très limitées de la germination et de la floraison, en est-il de même aux autres époques de leur vie, pendant le phénomène ordinaire de la végétation? On en a douté assez longtemps, les observations ayant même donné souvent, au lieu d'un excès de température, un certain abaissement au-dessous de l'air ambiant. Mais les expériences de Dutrochet et de Gœppert ont montré que ces résultats négatifs provenaient de ce que les observateurs ne s'étaient point préservés des causes d'erreur, rayonnement, conductibilité et surtout évaporation. Voyons comment procédait le premier de ces physiciens pour constater la production de chaleur dans le phénomène de la végétation. La figure 186 représente l'appareil qu'il employait dans ce but. *a* et *b* sont deux tiges d'asperge; l'une *b* a été tuée par l'immersion dans de l'eau à 50 degrés; l'autre *a*, entièrement semblable à la première, est plongée, aussitôt coupée, dans un flacon plein d'eau fraîche, afin qu'elle continue à vivre. On prend un pot qu'on remplit de sable humide, on y dispose les deux asperges, l'une dans son flacon, l'autre suspendue par un fil à une branche de bois sec. On introduit dans chacune d'elles les deux extrémités soudées *ee'* d'une aiguille thermo-électrique *c*, dont les fils sont mis en relation avec le galvanomètre multiplicateur. On

1. Emery, *La vie végétale*. Paris, Hachette.

pose sur le vase une plaque de plâtre MN percée d'une ouverture convenable, et on recouvre le tout d'une cloche en verre. L'air de la cloche se sature d'humidité, de sorte que toute évaporation se trouve supprimée. Dutrochet a constaté ainsi, dans les parties vertes et vivantes des végétaux, un excès de température sur l'air ambiant, excès très faible à la vérité, puisqu'il se mesure par quelques dixièmes de degré, mais qui n'en est pas moins réel et suffit à prouver que les plantes produisent de la chaleur dans l'acte de la végétation ordinaire.

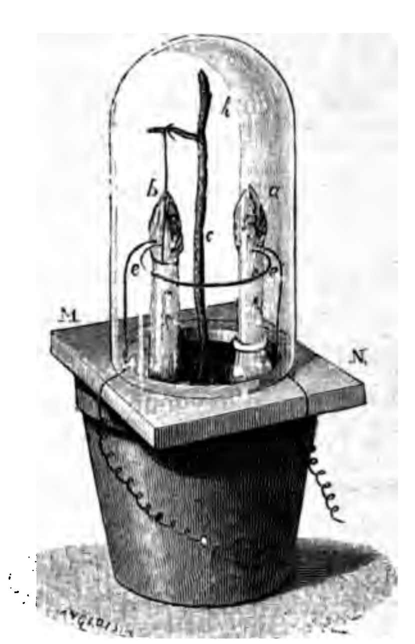


Fig. 186. — Appareil Dutrochet pour mesurer la chaleur développée dans la végétation.

Pour trouver les causes de la chaleur propre des végétaux, il fallait analyser les trois fonctions principales de la germination, de la floraison et de la végétation en général. Or il est prouvé par de nombreux travaux que, pour germer, la graine a besoin de l'oxygène de l'air, qui lui sert à brûler une partie de son carbone et de son hydrogène : c'est cette réaction chimique qui donne lieu à la production de chaleur observée. Il en est de même de celle qui se manifeste d'une façon si marquée dans les fleurs, et surtout dans les organes de reproduction, au moment de l'émission du pollen. En dehors de ces deux actes qui ne comprennent qu'une partie limitée de la vie de la plante, le phénomène de la végétation est plus complexe. On sait que, sous l'influence de la lumière, les parties vertes des plantes à chlorophylle décomposent l'acide carbonique de l'atmosphère, fixent le carbone et dégagent l'oxygène : c'est la fonction qui correspond à l'assimilation chez les animaux. Une autre fonction de la vie végétale est la respira-

tion, qui consiste, au contraire, dans l'absorption de l'oxygène atmosphérique et dans le dégagement d'acide carbonique et d'eau. C'est ce dernier phénomène qui donne lieu à la production de la chaleur propre à la végétation.

Ces deux fonctions si différentes reçoivent communément les noms de *respiration diurne* et de *respiration nocturne*, parce qu'elles s'effectuent, la première pendant le jour, et la seconde principalement pendant la nuit. Mais il y a là une confusion que notre grand physiologiste Claude Bernard a fait ressortir en ces termes :

« On a confondu, dit-il, sous la dénomination unique de respiration végétale, deux ordres de faits bien différents, et qui n'ont aucun caractère commun, si ce n'est de consister en des échanges de gaz entre la plante et l'atmosphère. La vérité est que les deux phénomènes sont directement opposés : l'un consistant en une absorption d'acide carbonique, une restitution d'oxygène, tandis que l'autre, au contraire, consiste en une absorption d'oxygène et une formation d'acide carbonique.

« Le premier de ces phénomènes, réduction de l'acide carbonique, est exclusif à certains éléments du végétal, à la chlorophylle, dont la faculté spéciale, immanente à sa substance, se manifeste seulement lorsque cette substance est soumise à l'influence solaire. Il faut donc reconnaître là une propriété limitée dépendant de l'irritabilité fonctionnelle, et non point une propriété générale, dépendant de l'irritabilité nutritive. On pourra désigner, si l'on veut, cette manière d'être de la chlorophylle sous le nom de *propriété chlorophyllienne*, et l'assimiler à toutes les autres propriétés fonctionnelles.

« Au contraire, le phénomène inverse, qui consiste en une absorption d'oxygène et un dégagement d'acide carbonique, dépend d'une propriété générale propre à toute cellule organisée et appartenant à tout ce qui vit. Ce phénomène est entièrement semblable chez le végétal à l'acte respiratoire que l'on observe chez les animaux. Il mérite seul le nom de respiration dans les deux règnes.

« Les échanges gazeux entre les végétaux et l'atmosphère sont donc commandés par deux influences distinctes et antagonistes : la *propriété chlorophyllienne* et la *propriété respiratoire* proprement dite.

« Celle-ci est absolument générale, elle est commune à tous les éléments anatomiques végétaux ou animaux ; elle ne s'arrête et ne se suspend jamais ; elle a tous les caractères de l'irritabilité nutritive, à savoir la continuité et l'universalité. On la constate dans les fleurs, les bourgeons, les graines, les tiges, les racines ; on la trouve dans les plantes sans chlorophylle, comme les orobanchées et les champignons ; enfin, elle existe aussi dans les organes verts, où elle constitue ce qu'on a appelé la *respiration nocturne* ou la *respiration à l'ombre*, en l'opposant à la fonction diurne chlorophyllienne qui a besoin des rayons solaires pour s'exercer. Mais de jour ou de nuit, à l'ombre ou au soleil, à l'air ou dans l'eau, la respiration ne cesse jamais, car sa cessation serait la mort.

« En résumé, la propriété respiratoire proprement dite est commune au végétal et à l'animal : l'un et l'autre ont besoin d'oxygène pour accomplir les combustions organiques qui se passent en eux. C'est là, par conséquent, une analogie frappante qui, au lieu de prouver la dualité de la vie dans les deux règnes, en manifeste au contraire l'harmonieuse unité. »

On voit donc en définitive, et c'est par là que nous devons conclure en nous plaçant au point de vue exclusivement physique, que la chaleur propre aux êtres vivants, animaux ou végétaux, a pour cause un phénomène de combustion, c'est-à-dire une combinaison chimique.

§ 5. CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES.

Les actions mécaniques, le frottement, la percussion, la compression, développent de la chaleur, tout comme les mouvements plus intimes qui constituent les phénomènes de combinaisons chimiques. Les exemples abondent de cette transfor-

mation du mouvement en chaleur, et chacun de nous peut les observer aisément. Citons-en quelques-uns.

Un bouton de métal qu'on frotte vivement contre une étoffe ou tout autre corps solide, s'échauffe et devient brûlant : les écoliers connaissent à merveille ce moyen d'amusement ou de distraction. Le frottement d'une scie contre le morceau de bois qu'elle sert à diviser, celui d'un rasoir ou d'un couteau qu'on repasse sur une pierre, de la lime contre le métal qu'elle mord, élèvent la température des objets soumis à ce mouvement violent, et dont les molécules se trouvent ainsi ébranlées. Les étincelles que les fers des chevaux font jaillir sur le pavé, celles que produit le frottement de l'acier sur la roue du rémouleur, ou encore celles qui enflamment l'amadou dans le maniement du briquet à silex, proviennent les unes et les autres de la haute température dégagée par le frottement : des parcelles métalliques très fines se détachent, et la chaleur développée est suffisante pour porter d'aussi petites masses à l'incandescence[1].

Des morceaux de bois bien secs, frottés l'un contre l'autre, s'échauffent ; de la fumée se dégage ; et, si l'on en croit les récits des voyageurs, les sauvages arrivent même par ce moyen à se procurer du feu. Les tourneurs produisent les filets noirs, qu'on voit quelquefois sur les objets qu'ils travaillent, en pressant fortement une pièce de bois tranchante sur le point qu'ils veulent brunir. L'échauffement qui résulte de cette pression, jointe au mouvement rapide de rotation du tour, est assez fort pour carboniser le bois sur le pourtour de l'objet. Les tourillons des machines, les essieux des voitures, des wagons de chemins de fer, s'échauffent fortement par le frottement résultant d'une rotation rapide et prolongée. Ils prendraient feu si l'on n'avait soin de les lubrifier en les graissant.

1. « Avant l'invention des lampes de sûreté de Davy, le grisou était la grande plaie des houillères, et bien des mines restaient inexploitées, inabordables, à cause de la présence de cet invincible ennemi. Comme on ne pouvait se servir des lampes ordinaires, on avait imaginé d'éclairer les chantiers au moyen d'une roue d'acier tournant contre une pierre à fusil. » (Simonin, *La vie souterraine*.)

Il faut citer ici, comme exemple de l'énorme quantité de chaleur que peut dégager le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre, l'expérience célèbre faite par Rumford en 1798; cette expérience avait été suggérée à l'illustre physicien, pendant qu'il surveillait, à Munich, le forage des pièces de canon. Vivement frappé de la grande quantité de chaleur que dégageait cette opération, il voulut la mesurer d'une façon plus précise. Il fit donc disposer un cylindre métallique, destiné à l'opération du forage, dans une caisse en bois remplie d'eau, dont la température était donnée par un thermomètre plongé dans le liquide. Une heure après que le frottement du foret contre le cylindre eut commencé, la température de l'eau, de 16° au début, s'élevait à 46°. Au bout de deux heures, elle était de 81°, et enfin, une demi-heure plus tard, l'eau entrait en complète ébullition. « Il serait difficile, dit Rumford, de décrire la surprise et l'étonnement exprimé par le visage des assistants à la vue d'une si grande quantité d'eau (environ dix litres) chauffée et rendue bouillante sans le moindre feu. »

Tyndall, après avoir cité, dans ses *Leçons sur la chaleur*, la célèbre expérience de Rumford, fait observer à ses auditeurs que le temps lui manque pour la répéter devant eux dans les conditions primitives; « mais, ajoute-t-il, je suis en mesure de vous montrer en substance le même effet en *deux minutes et demie*. J'ai ici un tube de cuivre, dont la longueur est de 10 centimètres, le diamètre de 2 centimètres. Il est bouché au fond, et je le visse verticalement sur une table avec roue et manivelle pour le faire tourner rapidement. J'ai en outre deux morceaux de bois de chêne réunis par une charnière, et dans lesquels sont creusées deux rainures semi-circulaires, destinées à embrasser le tube de cuivre. Ces morceaux de bois forment une sorte de pince (fig. 187), et, serrant doucement, je puis produire un frottement entre le bois et le tube de cuivre mis en rotation. Je remplis à peu près le tube d'eau froide, je le bouche avec un bouchon de liège pour empêcher que le liquide s'échappe et m'éclabousse, et je mets l'appareil en

mouvement. Tant que l'action continue, la température de l'eau s'élève, et quoique les deux minutes et demie ne soient pas encore écoulées, ceux qui sont près de l'appareil peuvent voir la vapeur s'échapper du bouchon. Trois ou quatre fois aujourd'hui j'ai projeté le bouchon par la force de la vapeur à une hauteur de 7 mètres dans l'air; c'est ce qui arrive encore : la vapeur suit le bouchon, et, en se précipitant, produit ce petit nuage dans l'atmosphère. »

Le frottement des solides contre les liquides et contre les gaz développe aussi de la chaleur : une expérience de Joule,

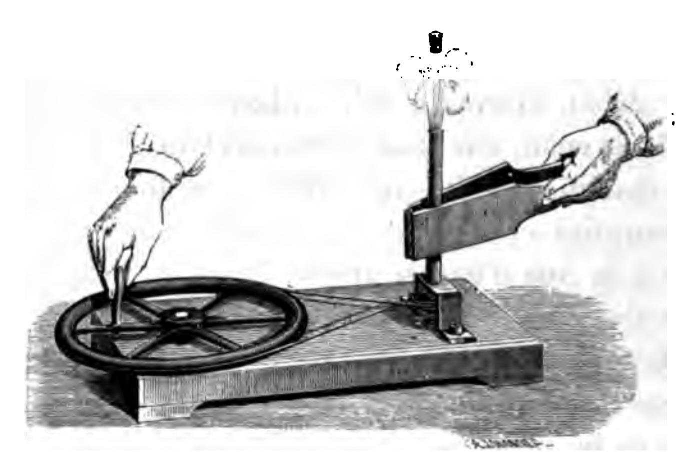


Fig. 187. — Expérience de Tyndall. Chaleur dégagée par le frottement.

sur laquelle nous reviendrons, a mis en évidence l'échauffement d'une masse liquide, agitée par des palettes métalliques tournant autour d'un axe. C'est au frottement contre les couches de l'atmosphère qu'on a attribué longtemps l'incandescence des aérolithes qui traversent, avec une vitesse considérable, l'enveloppe aérienne de notre globe; mais Regnault a prouvé qu'elle est due à une autre action mécanique, la compression. L'élévation de température causée par le frottement d'une masse gazeuse contre un corps solide est du reste mise hors de doute par une expérience très simple, que Tyndall a faite dans ses conférences sur la chaleur : avec un soufflet, il lançait un courant d'air sur l'une des faces de la pile thermo-

électrique; l'aiguille du galvanomètre était aussitôt déviée, et le sens de sa déviation indiquait que la face de la pile avait été chauffée par l'air en mouvement.

Terminons cette énumération de phénomènes, qui tous prouvent la génération de la chaleur par une force mécanique, en citant une expérience importante de Davy : cet illustre phy-



Fig. 188. — H. Davy.

sicien parvint, en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de glace bien essuyés, à fondre une certaine quantité d'eau solide. Voici ce qui donne un grand intérêt à cette expérience : pour expliquer le dégagement de chaleur que donne le frottement, les partisans de la matérialité de la chaleur, ceux qui la considéraient comme un fluide contenu dans les interstices des molécules des corps, raisonnaient ainsi : « Le frottement

change la capacité calorifique des différents corps; il diminue cette capacité, de sorte que la chaleur emmagasinée avant l'action mécanique ne peut plus séjourner tout entière dans le corps, après le changement moléculaire dont il s'agit : c'est cette chaleur qui se dégage par le frottement, et, de latente qu'elle était, devient sensible. » Or l'expérience de Davy rend cette explication impossible. Rappelons-nous, en effet, que l'eau a une capacité calorifique double de celle de la glace : après la fusion d'une certaine quantité de glace, l'eau résultante contient plus de chaleur latente qu'auparavant; on ne pourrait donc comprendre d'où provient la chaleur qui a servi à produire le passage de la glace à l'état liquide. Et enfin, on conclut de là que c'est la force mécanique mise en jeu dans le frottement qui se transforme en chaleur, c'est-à-dire en une force d'un autre genre : il y a transformation d'un mouvement visible en un mouvement moléculaire ou atomique.

La percussion et la compression développent la chaleur comme le frottement. Ainsi, quand on enfonce un clou dans une pièce de bois à coups de marteau, non seulement le clou s'échauffe, effet qui peut résulter en partie du frottement contre le bois, mais le marteau lui-même (si sa masse n'est pas trop considérable en comparaison de celle du clou) accuse une élévation de température. Une barre de fer, battue à coups redoublés, peut s'échauffer assez pour rougir. Des flans d'or, d'argent, de cuivre, comprimés sous le balancier qui sert à frapper les monnaies, s'échauffent, mais l'élévation de température n'est pas la même pour les différents métaux. Une expérience ingénieuse de Tyndall montre le développement de chaleur qui résulte de la compression du bois. « J'ai ici, dit-il, un morceau de sapin, à une température inférieure à celle de la salle, et donnant, lorsqu'il est mis en contact avec la pile (thermo-électrique), la déviation qui dénote du froid. Je place ce bois entre les plaques d'une petite presse hydraulique, et je le comprime fortement. Les plaques de la presse sont pareillement, vous le remarquerez, plus froides que l'air de la salle. Après

la compression, je porte le bois au contact de la pile : voyez l'effet. Le galvanomètre prononce que de la chaleur a été développée par l'acte de la compression[1]. » En général, la quantité de chaleur développée par les actions mécaniques dépend de la nature des substances soumises à ces actions, de l'état de leur surface, de la pression exercée.

La compressibilité des liquides est très faible : néanmoins, en exerçant sur des masses liquides des pressions considérables, de 30 à 40 atmosphères par exemple, on a pu constater un dégagement de chaleur. La compression des gaz peut s'exercer dans des limites extrêmement étendues : aussi obtient-on une élévation de température assez considérable, quand on comprime brusquement une masse gazeuse dans un espace limité. C'est ce fait qui sert de principe au *briquet à air*, ou *pneumatique*, que nous avons décrit dans le premier volume de cet ouvrage (fig. 189).

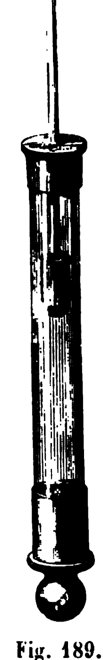


Fig. 189. Briquet à air.

Pour que le morceau d'amadou, fixé à l'extrémité du piston, s'enflamme, l'air intérieur doit être réduit par la compression au douzième de son volume. L'élévation de température qui résulte de cette diminution brusque du volume de l'air, est d'environ 500°, tandis qu'il suffit de 300° pour l'inflammation de l'amadou. Une notable portion de la chaleur développée est en effet absorbée par les parois de l'instrument et par le piston, dont la masse est bien plus considérable que celle de l'air intérieur.

L'expansion d'un gaz produit l'effet inverse de la compression, c'est-à-dire un abaissement de température : nous avons vu du gaz acide carbonique, d'abord comprimé à 40 ou 50 atmosphères dans un récipient, puis liquéfié, se refroidir tellement par la dilatation que produit son passage à l'air libre,

1. *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*, Leçon I.

qu'il passe de l'état liquide à l'état solide sous la forme de flocons, blancs comme la neige. Leur température descend alors jusqu'à 100 degrés au-dessous de zéro.

Le même phénomène de refroidissement a lieu quand la vapeur d'eau sort en jet d'une chaudière à haute pression, par exemple de la soupape de la marmite de Papin. Sa dilatation subite est accompagnée d'un refroidissement qui la condense sous la forme de brouillard épais : en plongeant la main dans le jet de vapeur, on éprouve une sensation de fraîcheur qui étonne au premier abord. Il faut bien se garder de faire cette expérience quand la vapeur contenue dans la chaudière n'est qu'à la pression atmosphérique ordinaire. En s'échappant dans l'atmosphère à cette pression, elle conserverait la température de 100° : on serait cruellement brûlé en y plongeant la main.

CHAPITRE XVI

NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE

§ 1. ANCIENNES HYPOTHÈSES SUR LA NATURE DE LA CHALEUR.

Nous voici arrivés au terme de notre description des phénomènes et des lois de la chaleur. En laissant de côté, comme le comporte notre programme, tout ce qui regarde le côté mathématique de cette branche de la physique, pour ne nous attacher qu'à la démonstration expérimentale des lois, nous avons pu passer en revue les principales propriétés qui se manifestent dans les corps soumis à l'action de l'agent calorifique, propriétés qui, en dernière analyse, se réduisent à deux : des variations de volume et des changements d'état. En y joignant les lois qui caractérisent les deux modes de propagation de la chaleur par voie de rayonnement et de conductibilité et l'étude des principales sources naturelles ou artificielles de chaleur, l'exposé très élémentaire que nous avions en vue s'est trouvé complet. Si nous résumons ainsi en quelques lignes la matière des chapitres qui précèdent, c'est afin de faire remarquer au lecteur que, dans aucun cas, il n'a été nécessaire à notre exposé de formuler aucune hypothèse sur la nature de la chaleur. La mesure des dilatations des solides, des liquides et des gaz, les procédés thermométriques qu'on en déduit sont parfaitement suffisants pour définir l'état thermique d'un corps ou d'un milieu, et pour connaître, en consultant les résultats de l'expérience, les lois de l'équilibre de température dans un système

quelconque. Ces lois peuvent être très compliquées, mais il n'est pas nécessaire, pour les établir, de savoir ce qu'est en soi la chaleur. Il en est de même de tout ce qui regarde les changements d'état, phénomènes de transition ou de rupture d'équilibre entre les molécules des corps, sortes de points critiques en dépendance intime avec les variations isolées ou simultanées de pression et de température. La connaissance de la nature de la chaleur n'a pas été non plus indispensable à la détermination des quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans tel ou tel phénomène, d'échauffement, de refroidissement, de liquéfaction, de solidification, de combustion, etc. C'est seulement lorsqu'on arrive à l'étude des sources de chaleur qu'on est amené à se poser, pour aller plus loin, le problème de la cause de la chaleur, de la nature physique ou mécanique de l'agent qui prend naissance dans la combinaison chimique, dans le frottement, la percussion, etc.

Cependant, par une tendance tout à fait irrésistible de l'esprit humain, les physiciens et aussi les philosophes de tous les temps n'ont pas manqué d'agiter sinon de résoudre le problème en question. Il en a toujours été ainsi, sans grand profit pour la science. Chercher la cause des choses avant qu'on ait recueilli et classé les faits, qu'on ait interrogé la nature par la méthode rigoureuse de l'observation expérimentale, et formulé les lois des phénomènes, lois qui ne peuvent être mises en évidence qu'après des mesures nombreuses et précises et des vérifications multipliées, c'est suivre une marche contraire à celle que l'histoire tout entière des sciences physiques et naturelles démontre comme seule fructueuse. Sans manquer de respect à des philosophes qui, à d'autres points de vue, ont été de grands génies, on peut soutenir qu'Aristote et les Péripatéticiens n'ont pas jeté une grande lumière sur la nature de la chaleur, lorsqu'ils la définissent « une qualité ou un accident qui réunit ou rassemble des choses homogènes, c'est-à-dire de la même nature et espèce, et qui détruit ou sépare des choses hétérogènes ou de différentes natures ». Les Épicuriens n'avançaient

pas beaucoup plus la connaissance des choses, lorsqu'ils disaient que « la chaleur est la substance volatile du feu même, réduite en atomes et émanée des corps ignés par un mouvement continuel ». C'est bien là, à peu près, l'une des deux hypothèses modernes qui ont été proposées pour rendre compte de la chaleur; mais est-il besoin de dire que des formules aussi vagues n'ont pas été et ne pouvaient être d'aucune utilité pour le progrès de la science.

Cette opinion de Démocrite, que la chaleur est une substance *sui generis*, a été reprise dans les temps modernes par des chimistes et physiciens, tels que Homberg, Lémery, Gravesande, Boerhaave. D'Alembert, dans l'*Encyclopédie*, donne en ces termes l'analyse des idées que professait ce dernier savant sur la chaleur ou sur le feu : « Ce que nous appelons *feu* est un corps par lui-même, *sui generis*, qui a été créé tel dès le commencement, qui ne peut être altéré en sa nature ni en ses propriétés, qui ne peut être produit de nouveau par aucun autre corps, et qui ne peut être changé en aucun autre, ni cesser d'être feu. Ce feu est répandu également partout, et il existe en quantité égale dans toutes les parties de l'espace : mais il est parfaitement caché et imperceptible, et ne se découvre que par certains effets qu'il produit, et qui tombent sous nos sens. Ces effets sont la *chaleur*, la *lumière*, les *couleurs*, la *raréfaction* et la *brûlure*, qui sont autant de signes de feu dont aucun ne peut être produit par quelque autre cause que ce soit. » Pour que les uns ou les autres de ces effets se produisent, il faut certaines circonstances, et notamment que le feu soit amassé ou réduit dans un espace plus étroit. C'est ce que produisent les corps lumineux ou incandescents, ou les procédés de concentration des rayons, comme les miroirs concaves et les lentilles, ou enfin les actions mécaniques, telles que le frottement. Il est aisé de voir, dans ces idées de Boerhaave, la doctrine de la matérialité de la chaleur que professaient encore beaucoup de physiciens de notre siècle et qui se traduisait dans leurs écrits par l'expression significative de *calorique*. A

la vérité, cette expression reste usitée, même aujourd'hui, mais sans que les savants qui s'en servent y attachent le sens étroit d'une substance spéciale constituant la chaleur.

La seconde hypothèse est celle qui regarde la chaleur non plus comme une substance, mais comme un mouvement. Elle a eu, dans les derniers siècles, d'éminents partisans. D'après Bacon (*Novum organum, de formâ calidi*), « la chaleur est un mouvement d'extension, par lequel un corps s'efforce de se dilater, ou de se donner une plus grande dimension que celle qu'il avait auparavant; ce mouvement n'est point égal ou uniforme, ni dans tout le corps, mais il existe dans ses plus petites parties seulement, comme il paraît par le tremblement ou la trépidation alternative des particules des liqueurs chaudes, du fer rouge, etc., et enfin ce mouvement est extrêmement rapide ». En un mot, le philosophe anglais définit la chaleur « un mouvement d'extension et d'ondulation dans les petites parties d'un corps, qui les oblige de tendre avec une certaine rapidité vers la circonférence, et de s'élever un peu en même temps ». Et il ajoute que « si l'on peut exciter dans quelque corps naturel un mouvement qui l'oblige de s'étendre et de se dilater, ou donner à ce mouvement une telle direction dans ce même corps que la dilatation ne s'y fasse point d'une manière uniforme, mais qu'elle n'en affecte que certaines parties, on y produira de la chaleur ».

Ces définitions très vagues sont évidemment basées sur des faits plus ou moins bien observés ou interprétés, et il paraît bien que ce sont les agitations visibles des corps très chauds qui ont conduit Bacon à son idée d'un mouvement moléculaire.

Boyle adopte également l'hypothèse de la nature mécanique de la chaleur, qui, dit-il, « semble consister principalement dans la propriété de la matière qu'on nomme *mouvement* », à certaines conditions toutefois, par exemple « que l'agitation des parties du corps soit violente, que la détermination du mouvement soit diversifiée, et qu'elle soit dirigée en tous sens. Il faut en outre que toutes les particules agitées, ou du moins

la plupart, soient assez petites pour qu'aucune d'elles ne puisse tomber sous les sens. » Cette dernière condition prouve combien Boyle se faisait une idée plus nette à la fois et mieux approfondie que Bacon du genre de mouvement qui constitue la chaleur. Il insiste surtout d'ailleurs sur la possibilité de produire de la chaleur par les seules actions mécaniques, et il cite à l'appui des expériences qu'on invoque aujourd'hui de la même manière et en faveur de la même hypothèse : « Dans la production du chaud, dit-il, l'agent ni le patient *ne mettent rien du leur, si ce n'est le mouvement et ses effets naturels*. Quand un maréchal bat vivement un morceau de fer, le métal devient excessivement chaud ; cependant il n'y a rien là qui puisse le rendre tel, si ce n'est la force du mouvement du marteau, qui imprime dans les petites parties du fer une agitation violente et diversement déterminée ; de sorte que ce fer, qui était d'abord un corps froid, reçoit de la *chaleur* par l'agitation imprimée dans ses petites parties. Ce fer devient chaud d'abord relativement à quelques autres corps, en comparaison desquels il était froid auparavant ; ensuite il devient chaud d'une manière sensible, parce que cette agitation est plus forte que celle des parties de nos doigts, et dans ce cas il arrive souvent que le marteau et l'enclume continuent d'être froids après l'opération. Ce qui fait voir que la *chaleur* acquise par le fer ne lui était point communiquée par aucun de ces deux instruments comme chauds, mais que la chaleur est produite en lui par un mouvement assez considérable pour agiter violemment les parties d'un corps aussi petit que la pièce de fer en question, sans que ce mouvement soit capable de faire le même effet sur des masses aussi considérables que celles du marteau et de l'enclume. Cependant, si l'on répétait souvent et promptement les coups, et que le marteau fût petit, celui-ci pourrait s'échauffer également ; d'où il s'ensuit qu'il n'est pas nécessaire qu'un corps, pour donner de la *chaleur*, soit chaud lui-même.

« Si l'on enfonce avec un marteau un gros clou dans une planche de bois, on donnera plusieurs coups sur la tête avant

qu'elle s'échauffe ; mais dès que le clou est une fois enfoncé jusqu'à sa tête, un petit nombre de coups suffiraient pour lui donner une chaleur considérable ; car, pendant qu'à chaque coup de marteau le clou s'enfonce de plus en plus dans le bois, le mouvement produit dans le bois est principalement progressif, et agit sur le clou entier dirigé vers un seul et même côté ; mais quand ce mouvement progressif vient à cesser, la secousse imprimée par les coups de marteau étant incapable de chasser le clou plus avant, ou de le casser, il faut qu'elle produise son effet en imprimant aux parties du clou une agitation violente et intérieure, dans laquelle consiste la nature de la *chaleur*. »

Newton paraît avoir aussi considéré la chaleur comme un mouvement vibratoire des molécules des corps, ainsi qu'il résulte de plusieurs passages de son *Optique :* « Les corps et la lumière n'agissent-ils pas mutuellement, l'un sur l'autre c'est-à-dire les corps sur la lumière, en la jetant, la réfléchissant, la rompant et la pliant, et la lumière sur les corps, en les échauffant, et en donnant à leurs parties *un mouvement de vibration en quoi consiste la chaleur?* » (*Question V.*) Et, plus loin : « Tous les corps fixes, lorsqu'ils sont échauffés au delà d'un certain degré, ne jettent-ils pas de la lumière, et ne brillent-ils pas? Cette *émission* n'est-elle pas produite par les vibrations de leurs parties? Tous les corps abondant en parties terrestres, et surtout en parties sulfureuses, ne jettent-ils pas de la lumière, toutes les fois que ces parties-là sont suffisamment agitées, soit que cette agitation soit produite par la chaleur, ou par la friction, la percussion, la putréfaction, par quelque mouvement vital ou par quelque autre cause que ce soit. » (*Question VIII.*)

Il est vrai que des partisans de l'hypothèse de la chaleur considérée comme une substance admettaient aussi cette même agitation des molécules des corps ; seulement alors elle n'est point cause, mais effet, car elle leur est communiquée par le feu qu'ils contiennent. Gravesande, par exemple, dit « que la

chaleur dans le corps chaud est une agitation des parties du corps effectuée par le moyen du feu contenu dans ce corps ».

§ 2. LES DEUX HYPOTHÈSES MODERNES SUR LA NATURE DE LA CHALEUR.

Arrivons enfin aux physiciens modernes et voyons comment ils formulent les deux hypothèses opposées, celle de la chaleur considérée comme une matière propre, qu'ils nomment le *calorique*, et celle qui regarde la chaleur comme un mode de mouvement. Dans le Mémoire de Laplace et de Lavoisier sur la chaleur spécifique des corps, on trouve les définitions suivantes, qui nous semblent plus particulièrement porter l'empreinte de l'esprit de l'auteur de la *Mécanique céleste :*

« Les physiciens sont partagés sur la nature de la chaleur. Plusieurs d'entre eux la regardent comme un fluide répandu dans toute la nature, et dont les corps sont plus ou moins pénétrés, à raison de leur température et de leur disposition particulière à la retenir ; il peut se combiner avec eux, et, dans cet état, il cesse d'agir sur le thermomètre et de se communiquer d'un corps à l'autre ; ce n'est que dans l'état de liberté, qui lui permet de se mettre en équilibre dans les corps, qu'il forme ce que nous nommons *chaleur libre.*

« D'autres physiciens pensent que la chaleur n'est que le résultat des mouvements insensibles des molécules de la matière. On sait que les corps, même les plus denses, sont remplis d'un grand nombre de pores ou de petits vides, dont le volume peut surpasser considérablement celui de la matière qu'ils renferment ; ces espaces vides laissent à leurs parties insensibles la liberté d'osciller dans tous les sens, et il est naturel de penser que ces parties sont dans une agitation continuelle, qui, si elle augmente jusqu'à un certain point, peut les désunir et décomposer les corps ; c'est ce mouvement intestin qui, suivant les physiciens dont nous parlons, constitue la chaleur.

« Pour développer cette hypothèse, nous ferons observer que, dans tous les mouvements dans lesquels il n'y a point de changement brusque, il existe une loi générale que les géomètres ont désignée sous le nom de *principe de la conservation des forces vives;* cette loi consiste en ce que, dans un système de corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque, la force vive, c'est-à-dire la somme des produits de chaque masse par le carré de sa vitesse, est constante. Si les corps sont animés par des forces accélératrices, la force vive est égale à ce qu'elle était à l'origine du mouvement, plus à la somme des masses multipliées par les carrés des vitesses dues à l'action des forces accélératrices. Dans l'hypothèse que nous examinons, la chaleur est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des molécules des corps ; elle est la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse.

« Si l'on met en contact deux corps dont la température soit différente, les quantités de mouvement qu'ils se communiqueront réciproquement seront d'abord inégales ; la force vive du plus froid augmentera de la même quantité dont la force vive de l'autre diminuera, et cette augmentation aura lieu jusqu'à ce que les quantités de mouvement communiquées de part et d'autre soient égales ; dans cet état la température des corps sera parvenue à l'uniformité...

« Nous ne déciderons point entre les deux hypothèses précédentes ; plusieurs phénomènes paraissent favorables à la dernière : tel est, par exemple, celui de la chaleur que produit le frottement de deux corps solides ; mais il en est d'autres qui s'expliquent plus simplement dans la première ; peut-être ont-elles lieu toutes deux à la fois. »

Depuis l'époque où ces lignes étaient écrites[1], les physiciens

1. En 1870, Verdet, en citant, dans son *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur*, les lignes les plus caractéristiques de ces passages, fait remarquer que, dans leurs travaux sur la chaleur, Lavoisier et Laplace n'ont fait aucun usage de ces notions si claires et si précises, que, n'y comparant jamais la chaleur qu'à elle-même, « il importe assez peu, pour la

ont continué à se partager entre les deux hypothèses de la matérialité de la chaleur et de sa nature purement dynamique. A la vérité, l'expression de *calorique*, employée également par les uns et par les autres, n'était qu'une façon de désigner, pour la commodité du langage, la cause inconnue des phénomènes de la chaleur : c'est une réserve qui leur a été commune à tous; et comme l'étude des faits, les expériences qu'elle suggérait, avaient avant tout pour objet la recherche de leurs lois, et n'exigeaient point le choix entre des idées purement théoriques, les progrès de la science n'eurent rien à souffrir de cette incertitude. La même chose était arrivée pour l'optique et pour la théorie de la lumière, où l'on a vu jusqu'au milieu de ce siècle les savants partagés entre deux hypothèses opposées, celle de l'émission ou de la matérialité de la lumière, et celle des ondulations, qui considère la lumière comme un mouvement vibratoire se propageant par les ondulations de l'éther. La victoire est restée à cette dernière théorie, si admirablement établie par Fresnel et définitivement confirmée par l'étude expérimentale de toute une série de phénomènes qui en sont une conséquence directe, tandis qu'ils restaient sans explication dans l'hypothèse de l'émission.

Deux séries de phénomènes ont contribué de même à faire pencher la balance en faveur de la théorie qui fait consister la chaleur dans un mouvement des molécules des corps. La première comprend tous les faits qui se rapportent à la propagation de la chaleur par voie de rayonnement. Nous avons vu en

fécondité de leurs raisonnements, qu'ils considèrent cette chaleur comme un corps indestructible ou comme une quantité de forces vives ». Quand Lavoisier écrivit en 1789 son *Traité de chimie*, il a bien soin de dire que l'expression de *calorique* par laquelle, d'accord avec Fourcroy, il désignait la cause de la chaleur, avait l'avantage « de pouvoir s'adapter à toutes sortes d'opinions, puisque, rigoureusement parlant, nous ne sommes pas même obligés de supposer que le calorique soit une matière réelle; il suffit que ce soit une cause répulsive quelconque qui écarte les molécules de la matière, et on peut ainsi en envisager les effets d'une manière abstraite et mathématique ». Laplace, au contraire, n'a pas maintenu ses réserves, et Verdet fait observer avec raison qu'après la période de son association avec Lavoisier, dans tout ce qu'il a écrit, il s'est montré le défenseur convaincu de la matérialité du calorique. « Son imposante autorité, ajoute-t-il, a même conservé des partisans à cette théorie bien longtemps encore après qu'elle ne reposait plus sur la moindre preuve. »

« Les ondulations de l'éther cessent d'être visibles lorsque leurs pulsations sont trop rapides ou trop lentes pour faire naître, en vertu d'un principe totalement analogue à la résonnance, les vibrations de la rétine ; elles produisent, au contraire, le *maximum* de sensation lumineuse lorsqu'elles se trouvent dans le plus grand *accord* possible avec l'*élasticité* des molécules nerveuses qui constituent cette membrane de l'œil. Par la même raison, certaines ondulations éthérées sont incapables d'exciter les réactions chimiques, tandis que d'autres sont douées de cette propriété au plus haut degré. Il en résulte que l'action chimique et la lumière dépendent plutôt de la *qualité* des ondulations que de leur *force d'impulsion* ou de leur *quantité de mouvement*. On conçoit alors parfaitement pourquoi la zone la plus éclairante et celle qui produit le plus grand effet chimique ne se rencontrent pas dans le spectre avec la zone de la température la plus élevée. »

Après avoir montré comment l'hypothèse de l'identité rend compte des effets variables de diffusion, de transmission et d'absorption par les substances blanches incolores, qui ne sont incolores que pour l'œil, mais qui en réalité sont thermochroïques, Melloni conclut en disant que « la chaleur est l'unique agent capable de mesurer les forces ou intensités relatives des rayons élémentaires qui composent les radiations du Soleil et des sources terrestres. La lumière et l'action chimique ne pourraient pas servir à ce but ; car elles ne sont pas toujours proportionnelles à l'énergie de la cause agissante, et ne représentent que des effets divers de la facilité plus ou moins grande avec laquelle les molécules pondérables placées à la surface des corps suivent les périodes des ondulations éthérées[1]. »

Ces idées sont aujourd'hui généralement adoptées dans la science, et l'on peut considérer comme démontrée l'hypothèse que le rayonnement de la chaleur consiste dans la propagation

1. *Mémoire sur l'identité des diverses radiations lumineuses, calorifiques et chimiques, vibrées par le Soleil et les sources terrestres*, par M. Melloni. Genève, 1842.

du mouvement ondulatoire de l'éther qui remplit tout l'espace, l'espace vide de matière pondérable, comme les intervalles moléculaires des corps solides, liquides ou gazeux. On est ainsi amené à regarder aussi la chaleur contenue dans les corps comme due à des vibrations. Mais comment ce mouvement a-t-il lieu? Est-il particulier aux atomes ou aux molécules, c'est-à-dire aux groupes d'atomes qui constituent les corps; ou bien appartient-il à l'éther contenu dans les espaces intermoléculaires? Enfin est-il commun à cet éther et aux molécules?

D'après Redtenbacher, les molécules et les atomes attirent les particules d'éther qui se repoussent mutuellement; sous l'influence de ces actions opposées, l'éther forme une sorte d'atmosphère autour de chaque atome ou de chaque molécule, et cette enveloppe constitue avec son noyau un tout individuel, auquel il donne le nom de *dynamide*. Pour ce savant « le mouvement calorifique consiste dans un certain mouvement radial des enveloppes éthérées qui entourent les atomes des corps ou les molécules, ces enveloppes se contractant et se dilatant alternativement. Les corps sont absolument froids, lorsque ces enveloppes sont en repos; ils ont un volume déterminé, lorsqu'il y a équilibre entre les actions réciproques des *dynamides;* mais quand les forces répulsives prédominent, la réunion des *dynamides* a besoin d'une enveloppe solide. Ce dernier cas correspond à l'état gazeux, et le premier à l'état solide ou à l'état liquide; dans l'état liquide, les *dynamides* peuvent glisser les unes sur les autres sans changer leurs distances respectives[1]. »

Le physicien dont nous venons de citer la théorie, fait jouer, comme on voit, un rôle important à l'éther intermoléculaire dans la production des phénomènes calorifiques. Un des savants contemporains qui ont développé avec le plus d'éclat la nouvelle théorie de la chaleur, Clausius, ne fait intervenir que les molécules matérielles des corps : c'est dans le mouvement de

1. *Théorie mécanique de la chaleur*, par le docteur G. Zeuner.

ces molécules que consiste la chaleur, et il admet qu'il n'est point le même dans les solides, dans les liquides et dans les gaz. Selon lui, « dans les solides, les molécules oscillent autour de certaines positions d'équilibre, sous l'influence de forces réciproques. Outre les mouvements oscillatoires rectilignes, les molécules peuvent avoir des mouvements de rotation oscillatoires autour de leurs centres de gravité, et il peut encore y avoir des mouvements dans leurs parties constituantes, c'est-à-dire dans leurs atomes.

« Dans les liquides, il y a un mouvement oscillatoire, rotatoire et translatoire ; la force vive n'est pas assez grande, relativement aux attractions réciproques des molécules, pour séparer entièrement ces molécules les unes des autres ; elles conservent aussi un volume limité, même quand il n'y a pas de pression extérieure.

« Dans les gaz, les molécules sont entièrement sorties de leurs sphères d'attraction mutuelle ; elles se meuvent en ligne droite d'après les lois ordinaires, et possèdent un mouvement de rotation, il est probable que les atomes oscillent aussi dans les molécules gazeuses[1]. »

Si les lois, vérifiées expérimentalement, de la chaleur rayonnante, ont conduit les physiciens à admettre l'identité de cause pour la chaleur et pour la lumière, et par suite à considérer la chaleur comme un mode de mouvement, soit de la matière pondérable, soit de l'éther, d'autres faits non moins significatifs ont milité pour la même hypothèse. On voyait depuis deux siècles la chaleur développée par la combustion du charbon produire la force expansive de la vapeur d'eau et celle-ci, convenablement distribuée, donner le mouvement aux machines : c'était la transformation de la chaleur en force mécanique. D'autre part, les expériences de Rumford, déjà pressenties par Boyle, ainsi qu'on l'a vu plus haut, faisaient voir une transformation inverse, c'est-à-dire la force mécanique produisant

1. Zeuner, *loc. cit.*

de la chaleur. Il ne restait plus, pour achever la démonstration, qu'à prouver qu'une quantité donnée de chaleur consommée produit toujours la même quantité de mouvement, le même travail, et réciproquement qu'à un travail mécanique donné et détruit correspond toujours le même nombre de calories. Essayons de donner une idée de la façon dont ce problème a été résolu et comment la solution a eu pour conséquence la théorie nouvelle de la chaleur.

Reprenons d'abord, avec un peu plus de détails, les expériences qui montrent comment les actions mécaniques donnent lieu à une production de chaleur.

§ 3. ÉQUIVALENCE DE LA CHALEUR ET DU TRAVAIL MÉCANIQUE.

Les expériences que Rumford fit en 1798, en montrant que l'énorme production de chaleur due au frottement d'une tarière contre le fond d'un cylindre métallique ne pouvait s'expliquer par une diminution de la chaleur spécifique du bronze réduit en limaille, étaient déjà décisives contre l'hypothèse de la matérialité du calorique. Celles de Davy, que nous avons également citées, le furent davantage encore.

D'ailleurs, pour produire de la chaleur, il n'est pas nécessaire qu'il y ait aucune division ou altération dans les surfaces frottées, et ce que nous disons ici du frottement s'applique à toute autre action mécanique. Quand une balle de fusil, un boulet viennent frapper contre un corps dur, tel qu'une plaque blindée, la transformation de la force vive en chaleur est assez considérable pour que la balle aplatie par le choc conserve des traces de fusion et que le boulet s'échauffe jusqu'au rouge.

Quand un corps tombe d'une certaine hauteur et vient frapper le sol, il en résulte une destruction de mouvement, ou plutôt la transformation de ce mouvement en chaleur[1]. Cela est vrai

1. Quand le corps et le plan sur lequel il tombe sont tous deux élastiques, s'il s'agit par exemple d'une bille d'ivoire tombant sur une plaque de marbre poli, le mouvement ne se

aussi bien pour les liquides que pour les solides; l'expérience suivante, que nous empruntons à M. Cazin, donne un moyen ingénieux de vérifier ce fait : « On dispose, dit-il, à une hauteur de 3 ou 4 mètres un vase qui contient du mercure et qui est fermé par un robinet muni d'un levier, afin qu'on puisse aisément l'ouvrir et le fermer sans s'élever à cette hauteur. Sur la même verticale, au-dessous de ce vase, est un vase de fer mince et contenant aussi du mercure (fig. 190). On établit un circuit thermo-électrique, à l'aide de deux soudures plongeant respectivement dans le mercure de chacun des vases et d'un galvanomètre. On s'assure d'abord, par la position de l'aiguille du galvanomètre, de l'égalité de température de ces deux vases, et on l'établit si elle n'a pas lieu. Puis on ouvre le robinet; le mercure tombe dans le vase inférieur, et y perd la vitesse qu'il avait acquise pendant la chute, sans produire aucun travail appréciable. Immédiatement l'aiguille du galvanomètre entre en mouvement et indique que

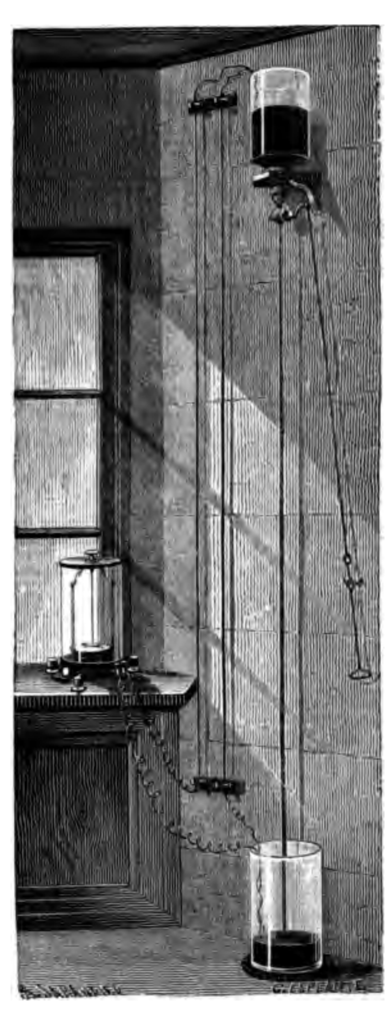


Fig. 190. — Chaleur produite par la chute d'un filet liquide.

détruit qu'au bout d'un certain temps. La bille rebondit, et si l'élasticité de l'ivoire et celle du marbre étaient parfaites, elle remonterait à la hauteur d'où elle est tombée, et le mouvement pourrait se continuer indéfiniment. Ce cas idéal suppose en outre que le milieu n'est pas résistant. En réalité, le phénomène est plus complexe. On sait qu'il n'existe point de corps dont l'élasticité soit absolue, pas de milieu qui n'offre une résistance, puisqu'on ne peut réaliser le vide absolu. Le mouvement visible de la bille finit donc par s'anéantir en

le vase inférieur s'échauffe graduellement. On conçoit qu'il soit possible de mesurer l'élévation de la température et d'en déduire, suivant les règles de la physique, le nombre de calories créées[1]. »

Il résulte de là que l'eau du bassin d'une cascade doit être plus chaude que celle qui s'échappe du sommet. Cela fait aussi comprendre cette assertion des marins, qu'après une tempête l'eau de la mer est devenue plus chaude. Si cet accroissement de température peut être constaté, il est manifestement dû à l'agitation des vagues, à la transformation par le choc de leur mouvement en chaleur.

Nous avons vu que la compression développe de la chaleur. D'autre part, nous savons que la glace à 0° fond et diminue de volume, sans que sa température change, si on lui fournit de la chaleur. La raison pour laquelle l'absorption de chaleur en pareil cas n'échauffe point l'eau de fusion vient de ce que toute cette chaleur est employée au travail de la contraction. Mais si, comme le fait observer M. Bertin[2], « nous fournissons ce travail par une compression extérieure, la chaleur nécessaire à la fusion sera moindre, et la glace pourra fondre au-dessous de 0°. Le point de fusion de la glace doit donc s'abaisser par la compression, et il en sera de même de tous les corps qui se dilatent en se solidifiant. Ce sera l'inverse pour ceux qui se contractent et qui sont les plus nombreux. » On a vu, dans le chapitre VII, les expériences qui confirment l'exactitude de cette explication.

Un bel exemple de la transformation du mouvement en chaleur est celui que nous fournit le phénomène des étoiles filantes et des bolides. On sait que ces corps étrangers à la Terre pénètrent dans notre atmosphère en vertu de leur mouvement

se communiquant aux molécules des corps qui se choquent, puis à celles de l'air ambiant, se transformant en ondulations sonores et probablement en partie aussi en chaleur. Avec un corps mou, la force vive du corps, d'une balle de plomb par exemple, disparaît entièrement presque aussitôt; mais un phénomène nouveau se manifeste, celui d'une élévation sensible de la température de la balle.

1. Cazin, *Les forces physiques*.
2. *Rapport sur les progrès de la thermodynamique*.



Imp Fraillery

INCENDIE CAUSÉ PAR LA CHUTE D'UN BOLIDE

A LA CHAUX (SAONE-ET-LOIRE), LE 16 JANVIER 1846

E. Cicéri pinxit, d'après un dessin de M. Ph. Jolyet.

de translation dans l'espace, combiné bien entendu avec le double mouvement de rotation et de translation de la Terre. La vitesse qu'ils possèdent au moment où a lieu cette pénétration est le plus souvent considérable; elle est tout à fait comparable aux vitesses planétaires et cométaires et peut atteindre et dépasser 20 kilomètres par seconde. Aussi la chaleur développée est-elle assez forte pour déterminer l'incandescence de la matière qui forme ces masses. De là ces traits de feu que nous voyons sillonner le ciel, puis s'éteindre, soit que le corps ait subi dans l'air une combustion complète, soit qu'il ne fasse que traverser l'atmosphère et continuer sa route dans l'espace, soit enfin, s'il s'agit d'un bloc solide, que la chaleur n'ayant pu pénétrer la masse entière, une mince couche ait été seule portée à l'incandescence. Les fragments de bolide à surface vitrifiée et fondue, recueillis encore chauds, sont des témoignages authentiques de la réalité de cette dernière hypothèse.

Pour expliquer la haute température subie par les étoiles filantes et les bolides, dans leur passage à travers les couches élevées de l'air, les savants ont admis, les uns que le frottement était la cause de la chaleur développée; les autres, que c'est la compression. Helmholtz admet la première explication : « L'incandescence et la haute température, dit-il, que possèdent encore des aérolithes dans les premiers instants de leur chute, s'expliquent depuis longtemps par leur frottement. En effet, une vitesse d'environ 1000 mètres par seconde suffirait pour porter à une température de 1000 degrés le fer météorique et le rendre lumineux, s'il absorbait seul toute la chaleur due au frottement. » (*Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles.*)

Dans son *Mémoire sur la détente des gaz*[1], Regnault prouve, par une série d'expériences, que, « lorsqu'un gaz coule, même avec une très grande vitesse, suivant des parois très étendues, il n'y a pas de dégagement sensible de chaleur que l'on puisse

1. Voir les *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1869, t. II.

attribuer au frottement des molécules gazeuses sur ces parois. »

« Cette conclusion, ajoute-t-il, est en opposition avec les idées généralement admises, et l'on peut citer beaucoup de faits qui semblent la contredire. J'indiquerai les plus importants.

« Un projectile qui traverse l'air avec une grande vitesse, s'échauffe beaucoup. On attribue ce fait à la chaleur qui serait dégagée par le frottement du projectile contre les molécules de l'air qu'il traverse.

« Les bolides traversent notre atmosphère avec une extrême vitesse; ils s'échauffent ainsi jusqu'à devenir incandescents, jusqu'à fondre complètement, ou seulement à leur surface. On attribue encore ce fait à la chaleur dégagée par la friction contre les molécules gazeuses.

« Je crois que, dans les deux cas, le dégagement de chaleur provient d'une autre cause, et qu'il est dû uniquement *à la chaleur dégagée par la compression de l'air*. »

Pour justifier son opinion, l'éminent physicien rend compte en ces termes de la façon dont, selon lui, les choses se passent : « Lorsqu'un mobile traverse l'air avec une vitesse plus grande que celle du son, l'élasticité de l'air est annulée dans ses effets, et la compression produite par le mobile n'a pas le temps de gagner les couches contiguës avant que celles-ci soient comprimées à leur tour par le mobile. Par suite de cette inertie, l'air se trouve comprimé comme il le serait dans un briquet à air. La chaleur provenant de cette compression passera, en grande partie, dans le mobile, dont elle élèvera la température. Le mobile ne sera d'ailleurs pas influencé par la détente de l'air qui produit du froid, car cette détente ne se fera que quand il aura passé. Ainsi, suivant moi, le mobile, marchant avec la même vitesse, recueillera toujours la chaleur qu'il dégage en comprimant l'air, et il ne subira pas le refroidissement produit par la détente subséquente des couches d'air qu'il vient de traverser.

« Il est évident d'ailleurs que la compression de l'air sera

d'autant plus énergique que le mobile sera doué d'une plus grande vitesse; la température du mobile s'élèvera donc successivement jusqu'à ce qu'elle soit égale à celle que prend une couche d'air qui subit instantanément la même compression dans un briquet à air. On s'explique ainsi très bien la très haute température que prend un bolide qui traverse notre atmosphère avec une vitesse beaucoup plus considérable que la vitesse de propagation du son.

« Un échauffement du même genre, mais plus faible, se produira pour un mobile qui traversera l'air avec une vitesse moindre que celle du son. Dans ce cas encore, le mobile sera plus influencé par la chaleur dégagée par la compression qu'il ne le sera par la chaleur absorbée par la détente. Les deux effets se compenseront sensiblement quand le mobile aura une très faible vitesse[1]. »

Si la compression développe de la chaleur, c'est qu'elle nécessite une consommation de force vive, c'est qu'une certaine quantité de travail est détruite. Inversement la dilatation d'un gaz détermine un abaissement de température qui correspond à une production de travail ou de force vive. Gay-Lussac, dans une expérience célèbre, a montré que les variations thermométriques résultant d'une compression et d'une dilatation égales d'un gaz sont égales elles-mêmes. Il employait deux grands ballons que réunissait un tube muni d'un robinet. Faisant un vide partiel dans l'un d'eux, puis attendant que la température devînt uniforme dans les deux ballons, il ouvrait le robinet. L'expérience montrait une élévation de tempéra-

1. Plus loin, le savant auteur du Mémoire explique ainsi la raison de ces faits d'expérience: « Selon moi, dit-il, il n'y a de chaleur dégagée par le frottement de deux corps que lorsque les molécules de l'un d'eux au moins ne sont pas absolument libres, c'est-à-dire quand elles sont sous l'influence d'une force quelconque d'agrégation. D'après nos observations, cette liberté absolue n'existerait réellement que dans les fluides immatériels, tels que l'éther, qui transmet les vibrations lumineuses. Elle n'est pas parfaite dans nos gaz, et par cela seul le mouvement d'un gaz le long d'une paroi solide doit dégager une certaine quantité de chaleur qui résulte uniquement de la transformation en chaleur de la perte de force vive subie par les molécules pour vaincre leurs résistances intérieures. Mes expériences prouvent que cette quantité de chaleur est si petite pour l'air atmosphérique, qu'elle échappe à nos moyens d'observation. »

ture dans le premier et un abaissement égal dans le second. Joule a répété la même expérience en faisant un vide aussi complet que possible dans un récipient métallique A, et en comprimant, dans un récipient pareil et de même capacité, B, de l'air atmosphérique à 22 atmosphères. Il portait le système des deux récipients dans un vase plein d'eau, puis ouvrait le robinet de communication. Le gaz comprimé dans B se précipitait dans A en doublant de volume. Or les thermomètres les plus délicats, immergés dans l'eau qui baignait les vases, n'accusèrent, au moment de l'ouverture du robinet, aucune variation de température. C'est que, comme le remarque justement Verdet, le gaz comprimé, en se précipitant dans le récipient vide, « n'a rencontré d'autre résistance que l'insignifiante résistance de la faible quantité d'air qu'une bonne machine pneumatique ne peut enlever. Ainsi, bien que la force élastique du gaz se soit réduite de 22 atmosphères à 11, aucun travail extérieur n'a été effectué. Aucune force vive sensible n'a été développée, puisque, à la fin comme au commencement de l'expérience, toutes les parties de l'appareil et le gaz qu'il contenait se sont trouvés en repos. Conformément à la théorie, aucune absorption de chaleur n'a eu lieu. » C'est là en effet le résultat définitif; mais, en analysant plus complètement ce qui se passe, il est aisé de voir que l'air comprimé du récipient B communique, pendant toute la durée de l'expérience, de la force vive à l'air qui passe dans A; il se refroidit donc. Cette force vive se détruit bientôt, tant par suite du frottement réciproque des molécules d'air que de leur choc contre les parois de l'appareil, et il en résulte un dégagement de chaleur précisément égal à l'absorption qui se fait dans B. Les deux effets opposés se compensent, ce qui explique la constance de la température de l'eau du vase qui enveloppe les récipients.

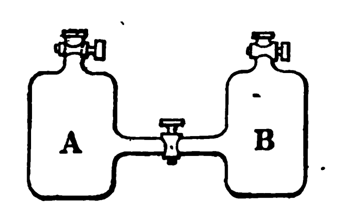


Fig. 191. — Expériences de Gay-Lussac et de Joule sur la détente des gaz.

Tyndall a présenté sous une forme ingénieuse le double phénomène du refroidissément dû à la dilatation de l'air et de l'élévation de température résultant de la destruction d'un travail extérieur. Dans la première expérience (fig. 192), un cube métallique muni d'un orifice à robinet renferme de l'air comprimé depuis un temps assez long pour qu'il ait pu prendre la température de l'air ambiant. En ouvrant le robinet, l'air s'échappe violemment au dehors. Comme c'est le gaz lui-même qui fournit la force vive nécessaire à cette expulsion, il se refroidit, employant ainsi sa propre chaleur à produire du



Fig. 192. — Expérience de Tyndall. Chaleur absorbée par le travail d'un gaz qui se dilate.

travail : ce que l'on constate en présentant au courant la face d'une pile thermo-électrique. La déviation de l'aiguille du galvanomètre indique un abaissement de température.

Si l'on comprime l'air d'un soufflet en employant la force musculaire des mains, c'est-à-dire si l'on expulse l'air qu'il contient par un travail mécanique extérieur, la destruction de ce travail donnera lieu à une production de chaleur. En effet, dans ce cas, l'expérience montre (fig. 193) que l'aiguille du galvanomètre dévie en sens contraire, indiquant une élévation de température de la face de la pile thermo-électrique.

Autre exemple emprunté à un corps solide. Une bande de caoutchouc que l'on étire, s'échauffe, ce qu'on reconnaît aisé-

ment en portant la bande étirée sur les lèvres. A quoi est due cette production de chaleur? M. Hirn a démontré que la densité du caoutchouc augmente quand on l'étire; c'est donc à une compression qu'est dû l'échauffement de la bande.

Terminons l'énumération de ces exemples de la transformation du travail mécanique en chaleur, en rappelant la belle expérience de Léon Foucault. Nous avons vu dans le tome III du MONDE PHYSIQUE en quoi consiste cette expérience. Un disque en bronze peut tourner, par l'action d'une manivelle, entre les pôles d'un électro-aimant, avec une vitesse de 150 à 200 tours par seconde. Supposons qu'avant d'animer l'électro-aimant on



Fig. 195. — Expérience de Tyndall. Chaleur développée par une destruction de travail.

imprime cette vitesse au disque; lorsqu'elle est obtenue, on fait passer le courant de six couples Bunsen dans les branches de l'électro-aimant fixe. Aussitôt des courants induits se développent dans le disque mobile; par leur réaction sur le courant des bobines de l'électro-aimant, ils s'opposent au mouvement, et l'éteignent en quelques secondes, « comme si, selon l'expression de Foucault, un frein invisible était appliqué au mobile ». Les courants induits cessent avec l'arrêt du disque, mais cette destruction de mouvement a dégagé de la chaleur dont on peut constater l'existence à l'aide d'instruments thermo-électriques. On peut donner à l'expérience une autre forme. On fait d'abord passer le courant dans l'électro-aimant, puis on essaye, en

poussant à la manivelle, de faire tourner le disque. Mais on éprouve une grande résistance; l'effort qu'il faut faire pour continuer le mouvement du disque seulement pendant quelques minutes, est assez grand pour que la conversion en chaleur du travail détruit élève la température du disque de 20 à 35 degrés au-dessus de la température de l'air. En réduisant



Fig. 194. — Expérience de Léon Foucault.

la pile à deux couples, et en prolongeant le mouvement pendant deux minutes, Foucault a vu un disque plat de cuivre rouge s'élever à la température de 60 degrés. C'est là, comme on voit, un exemple frappant de la transformation en chaleur du travail mécanique. La force vive de ce travail, en apparence anéantie, est en réalité communiquée aux molécules du disque et, de sa forme visible, passe à la forme invisible de travail d'oscillation et de désagrégation, selon l'expression de Clausius.

Les exemples que nous avons reproduits dans ce paragraphe de la transformation du travail en chaleur et de la chaleur en travail, étaient suffisants pour donner une haute probabilité à la théorie qui fait de la chaleur un mode de mouvement. Mais, pour qu'elle acquît un réel caractère de certitude, il fallait faire un pas de plus : c'est-à-dire déterminer par l'expérience les nombres qui mesurent, soit la quantité de travail créée par la consommation d'une unité de chaleur ou d'une *calorie*, soit la quantité de calories qui est nécessaire pour produire une unité de travail. En un mot, il fallait trouver soit l'*équivalent mécanique de la chaleur*, soit l'*équivalent calorifique du travail.*

§ 4. MESURE DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

C'est au docteur Jules-Robert Mayer (de Heilbronn) que revient l'honneur d'avoir énoncé pour la première fois, d'une manière précise, le principe de l'équivalence du travail et de la chaleur, à savoir, que la chaleur produite par l'accomplissement d'un travail quelconque est proportionnelle au travail dépensé, ou, ce qui revient au même, que l'une de ces quantités peut être mesurée par l'autre. Dans un mémoire intitulé *Remarques sur les forces de la nature inanimée* et publié en 1842, il établit ces principes, et calcule l'équivalent mécanique de la chaleur, qu'il évalue à 365 kilogrammètres. C'est un nombre qui s'écarte beaucoup des déterminations ultérieures; mais, ainsi que le remarque Verdet, la raison de cet écart tient à l'inexactitude des valeurs du coefficient de dilatation et de la chaleur spécifique de l'air qui avaient alors cours dans la science.

Les premières déterminations rigoureuses de l'équivalent mécanique de la chaleur sont dues au physicien anglais Joule, qui, dans l'ordre des dates, n'arrive qu'au troisième rang (après Mayer et l'ingénieur danois Colding), mais est « peut-être celui

qui a le plus fait pour la démonstration du nouveau principe et pour son adoption définitive[1] ». Entrons dans quelques détails sur les expériences de Joule.

Il plaçait dans un vase rempli de mercure deux plaques de fonte, l'une fixe, l'autre pressée contre la première à l'aide d'un levier chargé de poids ; puis il imprimait à cette seconde plaque un mouvement de rotation par la descente d'un poids. Le travail nécessaire pour vaincre le frottement des plaques s'évaluait en multipliant le poids par la hauteur de la chute, et la chaleur produite par l'élévation de température du mercure. Joule déduisit de ces expériences une valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur égale, en moyenne, à 425 kilogrammètres.

Dans une autre expérience, il comprimait de l'air, à l'aide d'une pompe foulante, dans un vase métallique plongé dans l'eau d'un calorimètre. Après un nombre déterminé de coups de piston, la pression de l'air ayant atteint un certain nombre d'atmosphères, il observait l'élévation de température de l'eau et en déduisait la quantité de chaleur cédée à ce liquide. L'échauffement n'étant pas dû tout entier à la compression de l'air, mais aussi au frottement du piston, il recommençait l'opération en laissant communiquer le récipient avec l'atmosphère, c'est-à-dire sans comprimer l'air. La chaleur produite par cette opération nouvelle était celle due au frottement dans la première opération. Joule trouva, en employant cette méthode, 438 kilogrammètres pour l'équivalent mécanique de la chaleur.

Joule utilisa encore, dans le même but, le frottement entre les solides et les liquides. Faisant tourner une roue à palettes dans l'eau ou dans le mercure (fig. 195), il observait l'élévation de température du liquide, et pouvait pareillement en déduire le nombre de calories créées par le frottement. D'autre part, il mesurait aisément le travail dépensé pour obtenir le mouve-

1. Verdet, *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur.*

ment de rotation. Ce mouvement étant obtenu par la chute de deux poids enroulés, à l'aide d'un double cordon, d'un côté à l'axe des palettes, de l'autre à deux poulies, le travail dépensé était égal au produit des deux poids par la hauteur de

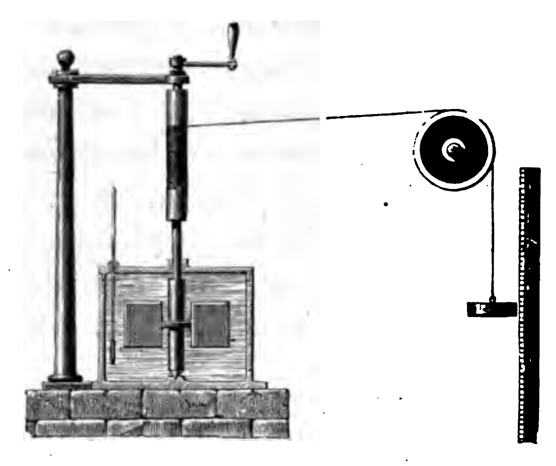


Fig. 195. — Expérience de Joule. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

chute de chacun d'eux. Joule trouva par cette méthode les nombres suivants :

	kgm.
Par le frottement du laiton dans l'eau.	423,92
— du fer dans le mercure	424,68

Soit environ, en moyenne, 424 kilogrammètres.

Favre a déterminé l'équivalent mécanique de la chaleur en étudiant la chaleur développée dans le frottement de l'acier sur lui-même. L'appareil à frottement était contenu dans le calorimètre à mercure de Favre et Silbermann, et nous avons vu comment on peut alors mesurer la chaleur produite. Quant au travail consommé par le frottement, il était mesuré par la chute du poids moteur de l'appareil. La valeur moyenne de l'équivalent mécanique ainsi déterminé était de 413 kilogrammètres, nombre un peu inférieur à celui de Joule.

On doit à M. Hirn (de Colmar) plusieurs séries de recherches analogues, portant, la première série sur le frottement de l'eau, la seconde sur l'écoulement de l'eau sous de fortes pressions, la troisième sur l'écrasement du plomb sous le choc du bélier.

la quatrième série enfin sur l'abaissement de température dû à l'expansion de l'air[1]. Les valeurs de l'équivalent mécanique de la chaleur déduites de ces recherches varient entre 433 et 424,5 kilogrammètres; elles se rapprochent beaucoup des résultats obtenus par Joule. On doit aussi au même savant des expériences d'un grand intérêt sur la machine à vapeur, qui prouvent que la chaleur perdue par la vapeur en passant de la chaudière par le cylindre dans le condenseur est proportionnelle au travail extérieur effectué par la machine. Connaissant la quantité d'eau vaporisée dans la chaudière et envoyée dans le cylindre, sa tension et sa température, M. Hirn put calculer la quantité de chaleur qu'elle contenait, en se servant des tables de Regnault. Mesurant d'autre part la quantité et la température de la vapeur condensée à sa sortie du cylindre, celles de l'eau injectée dans le condenseur, il obtint de même la mesure de la chaleur que possédait encore à ce moment la vapeur. D'un autre côté, M. Hirn a mesuré, non pas seulement le travail utile de la machine, mais celui qui était absorbé par les résistances passives, en un mot le travail total produit par la vapeur sur le piston du cylindre. « Bien interprétées, dit M. Verdet, les expériences de M. Hirn montrent que la vapeur apporte au condenseur moins de chaleur qu'elle n'en prend à la chaudière, et que la chaleur consommée à l'intérieur de la machine est proportionnelle au travail effectif de la vapeur. Le rapport de ces deux quantités est une nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur qui se rapproche des déterminations antérieures de M. Joule et de M. Favre. En effet, si les résultats individuels qu'on peut déduire des diverses expériences de M. Hirn oscillent entre des limites assez étendues, leur valeur moyenne est le nombre 413, précisément égal au nombre trouvé par M. Favre dans ses expériences sur le frottement de l'acier, et bien peu éloignés de ceux que M. Joule a fait connaître. »

1. Voir, pour le détail de ces expériences et des suivantes, l'*Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, par M. Hirn, 3e édition. Paris, 1875.

Nous nous bornerons à cette mention sommaire de quelques-unes des expériences qui ont servi directement à la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur. La valeur moyenne la plus généralement adoptée aujourd'hui est 424 ou 425 kilogrammètres. En prenant ce dernier nombre, cela signifie qu'en consommant la chaleur nécessaire pour élever de 1 degré centigrade la température de 1 kilogramme d'eau, ou *calorie*, on produit une quantité de travail suffisante pour élever 1 kilogramme à la hauteur de 425 mètres, ou 425 kilogrammes à la hauteur de 1 mètre. De même, le travail de 425 kilogrammètres converti en chaleur produirait 1 calorie. L'*équivalent calorifique de l'unité de travail* est donc, réciproquement, égal à $\frac{1}{425}$ de calorie.

Le tableau suivant, où se trouvent résumées les plus importantes recherches sur cette question si importante, donnera en même temps une idée des méthodes variées qui ont servi à la solution du problème.

Phénomènes qui ont servi à la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.	Noms des physiciens expérimentateurs.	Valeur de l'équivalent mécanique.
Propriétés générales de l'air. . . .	Mayer, Regnault . . . . . Clausius, Moll et Van Beck.	426
Frottement de l'eau par une roue à palettes	Joule.	424
Frottement du mercure par une roue à palettes.	Joule.	425
Frottement du mercure par une plaque de fer.	Joule.	426
Frottement de l'acier par l'acier. .	Favre.	413
Expériences sur la machine à vapeur.	Hirn	413
Chaleur des courants induits . . .	Joule.	452
Chaleur dégagée par une machine électromagnétique	Favre.	443
Chaleur totale dégagée dans le circuit d'une pile de Daniell. . . .	Weber, Joule	420
Chaleur dégagée dans un fil métallique traversé par un courant. .	Quintus Icilius.	400
Nouvelles expériences sur la machine à vapeur.	Hirn.	420 à 432

La connaissance de l'élément dont nous venons de donner la valeur avec toute l'approximation que permettent aujourd'hui les méthodes physiques et les procédés de mesure, a une importance sur laquelle il est inutile d'insister. Au point de vue théorique, il en est résulté un renouvellement complet de la science de la chaleur. Il ne nous appartient pas d'essayer ici d'en donner une idée, et nous ne pouvons que renvoyer aux ouvrages spéciaux sur la matière. Mais nous allons montrer par un ou deux exemples sous quel jour nouveau s'éclairent les phénomènes qui ont été décrits dans les chapitres précédents. Voici comment M. Bertin, dans son *Rapport sur les progrès de la thermodynamique*, interprète les changements d'état de l'eau, sa fusion et sa vaporisation : « Les changements d'état, dit-il, nous offrent un exemple curieux de la transformation de la chaleur en travail moléculaire. Quand on donne de la chaleur à de la glace à 0°, on ne l'échauffe pas, on la fond. Ici la force vive communiquée est entièrement transformée en travail moléculaire. Les molécules qui étaient orientées dans la glace se séparent pour se grouper de toutes les manières possibles. En général, dans ce nouvel arrangement, qui constitue l'état liquide, les molécules sont plus écartées que dans l'état solide, et le corps en fondant se dilate; mais il y a des exceptions, et notamment pour la glace, qui en fondant diminue de volume. Ces exceptions sont assurément fort curieuses, mais elles n'ont rien qui doive nous étonner. Nous ne pouvons pas dire à priori quel sera le signe du travail de désagrégation qu'on appelle la *fusion;* nous ne pouvons pas dire si les molécules s'écartent ou se rapprochent; il est seulement certain qu'elles se déplacent, et ce déplacement, quel qu'en soit le sens, constitue un travail moléculaire qui absorbe une quantité de force vive ou de chaleur : c'est là ce qu'on appelle la *chaleur latente*. L'expérience apprend que, pour la glace, cette chaleur latente est de 79,25 calories. Nous en concluons que la désagrégation des molécules de la glace et le nouveau groupement qui les constitue à l'état liquide sont une

opération mécanique qui, lorsqu'elle s'opère sur 1 kilogramme de glace, exige un travail de $425 \times 79,25 = 33681$ kilogrammètres.

« Quand de l'eau s'échauffe de 0° à 100°, elle ne se dilate que de la vingt-troisième partie de son volume; elle repousse alors la pression atmosphérique en accomplissant un travail externe qui est peu considérable, car il ne s'élève pas à 0,5 kilogrammètre par litre d'eau. Mais, une fois que l'eau est arrivée à 100°, une nouvelle addition de chaleur ne l'échauffe plus, elle la transforme en vapeur en lui faisant prendre un volume 1700 fois plus grand que le sien. Ici le travail extérieur est considérable, car il est toujours égal au produit de la pression atmosphérique par l'augmentation de volume, et ce produit, calculé pour 1 litre d'eau, est de 17 000 kilogrammètres. Ce travail extérieur absorbe déjà pour sa part 40 calories. Mais il y a, en outre, un travail moléculaire qui doit être très grand, car tout ce travail, tant interne qu'externe, absorbe 537 calories par kilogramme d'eau : c'est là ce qu'on appelle la *chaleur latente* de la vapeur d'eau. C'est, en réalité, la force vive de 537 calories qui s'est transformée en travail de deux espèces : 40 calories ont été employées à repousser la pression atmosphérique en produisant un travail de 17 000 kilogrammètres; et en même temps 497 calories ont été employées à écarter les molécules de la vapeur d'eau en produisant un travail de 211 225 kilogrammètres.

« Voilà le plus bel exemple, ajoute M. Bertin, de la transformation de la force vive de la chaleur en travail. De l'eau à 100° est de l'eau dans un certain état vibratoire, dont la force vive est indiquée par la température. Elle est en contact avec un foyer plus chaud, ou dont la force vive est plus grande, et cependant la force vive du mouvement vibratoire primitif n'est pas augmentée, puisque la température est demeurée stationnaire. Qu'est donc devenu le mouvement que le foyer a communiqué à l'eau, la force vive qu'il y a introduite? Elle s'est transformée en travail et l'eau s'est vaporisée. Dans l'acte de

la vaporisation, le travail extérieur n'est pas négligeable, mais il est cependant plus petit que le travail moléculaire. Dans la fusion, le travail externe est trop petit pour qu'il soit nécessaire d'en tenir compte, le travail interne est seul à considérer. Dans la dilatation des gaz, tout porte à croire que c'est, au contraire, le travail interne qui est négligeable. Que conclure de là? C'est que le travail interne est très variable, et qu'en général il échappe à toute détermination directe. »

« Il y a là une difficulté considérable, qui se présente chaque fois qu'on veut déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur; car, dans toutes les expériences qui tendent à ce but, on ne peut jamais mesurer que la chaleur et le travail extérieur : le travail moléculaire est toujours inconnu. Il est un moyen de tourner cette difficulté, et ce moyen nous le devons à Sadi Carnot. Il consiste à faire passer le corps par une série de changements qui le ramènent à son état primitif : c'est ce qu'on appelle un *cycle fermé*. Il est bien évident que, dans ce cas, le travail interne définitif est nul et se trouve, par cela même, éliminé. C'est dans ce cas seulement qu'il est permis de comparer la chaleur produite au travail extérieur détruit. Dans toute expérience établie pour déterminer les éléments de cette comparaison, il est donc indispensable qu'aucun changement permanent ne survienne dans l'état du corps, ou, en d'autres termes, que ce corps, à la fin des opérations auxquelles il aura été soumis, se retrouve exactement dans son état primitif. »

§ 5. PUISSANCE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR SOLAIRE[1].

Le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique, et la détermination très approchée de la valeur numérique de l'équivalent, ont permis d'aborder certains problèmes de physique céleste et terrestre sur lesquels on ne

1. Ce paragraphe et le suivant sont, pour la plus grande partie, empruntés à la monographie que nous avons publiée sous ce titre : LE SOLEIL.

possédait auparavant que les données les plus vagues et les plus hypothétiques.

Nous avons vu comment on pouvait évaluer en calories l'énergie des radiations solaires; nous avons donné les calculs qui permettent de dire quel poids d'eau cette prodigieuse source de chaleur mettrait en ébullition, quelle couche de glace elle fondrait à la surface du Soleil, dans le seul intervalle d'un jour; quelle couche de glace serait fondue à la surface du globe terrestre par la fraction de la chaleur solaire qui tombe en un an sur cette surface. Maintenant nous pouvons dire aussi quelle est la puissance mécanique de cet immense foyer, évaluer la somme des forces qu'engendrerait, à la surface de la Terre, toute la chaleur qu'il y verse incessamment, si cette chaleur était en effet convertie en travail.

En adoptant les résultats des mesures les plus récentes, qui fixent en moyenne à 0,002 calorie la quantité de chaleur versée en 1 minute sur chaque centimètre carré de la surface limite de l'atmosphère terrestre, on trouve qu'en une année chaque mètre carré de la surface de la Terre reçoit 2 547 300 calories : c'est plus de 25 milliards de calories par hectare, c'est-à-dire 10 826 025 000 000 de kilogrammètres. Ainsi la radiation calorifique du Soleil, en s'exerçant sur la superficie d'un de nos hectares, y développe sous mille formes diverses une puissance qui équivaut au travail continu de 4584 chevaux-vapeur. Sur la Terre entière, c'est un travail de 233 784 000 000 000 chevaux-vapeur.

583 milliards de machines, chacune d'une force effective de 400 chevaux, travaillant sans relâche le jour et la nuit, voilà donc ce que vaut pour notre planète seule la radiation solaire! A la vérité, toute cette puissance est loin de se transformer en travail. Une partie est employée à échauffer l'écorce terrestre jusqu'à une certaine profondeur; mais, comme le sol et l'atmosphère rayonnent dans l'espace et que le globe terrestre ne paraît perdre ni gagner au point de vue de la température moyenne, au moins pendant de longues périodes d'années,

toute cette fraction de la radiation du Soleil peut être considérée comme maintenant l'équilibre de température sur la planète.

Une autre partie se transforme en mouvements moléculaires, en actions et réactions chimiques, qui sont la source où la vie des végétaux et des animaux puise incessamment de quoi se perpétuer et s'entretenir. La chaleur qui semble ainsi propre à ces êtres n'est autre chose qu'une émanation de celle du foyer commun. « C'est ainsi, dit Tyndall à ce propos, que nous sommes, non plus dans un sens poétique, mais dans un sens purement mécanique, des enfants du Soleil. »

Enfin, la radiation calorifique du Soleil concourt à la production de la plupart des phénomènes de mouvement, sensibles à la vue, dont le sol, l'air et les eaux sont le théâtre continuel. C'est ce qu'il est aisé d'établir.

A quelle cause, en effet, sont dus les courants aériens, les mouvements réguliers ou irréguliers dont les masses gazeuses de l'atmosphère sont animées? A la chaleur solaire, qui directement échauffe peu les couches atmosphériques, mais qui, dardant à plomb sur le sol des régions tropicales, élève plus fortement qu'aux autres latitudes sa température. Les couches d'air les plus basses, en contact avec le sol, s'échauffent, se dilatent, et l'air raréfié dont elles se composent monte pour se déverser au nord et au sud vers les latitudes plus septentrionales, tandis qu'elles sont remplacées par les masses d'air plus froides que fournissent les régions tempérées et polaires. Ainsi naissent les vents réguliers connus sous le nom d'alizés, dont la direction d'ailleurs est modifiée par le mouvement de rotation de la Terre.

Deux fleuves aériens coulent ainsi incessamment dans chaque hémisphère, de l'équateur vers chaque pôle : l'un supérieur, se dirigeant vers le nord-est dans l'hémisphère boréal, vers le sud-est dans l'hémisphère austral ; l'autre inférieur, ayant une direction précisément contraire, par conséquent soufflant du nord-est ou du sud-est. « Ainsi naissent les grands vents de

notre atmosphère, matériellement modifiés toutefois par la distribution irrégulière des terres et des eaux. Des vents de moindre importance naissent aussi de l'action locale de la chaleur, du froid et de l'évaporation. Il est des vents produits par l'échauffement de l'air dans les vallées des Alpes, qui quelquefois s'élancent avec une violence soudaine et destructive à travers les gorges des montagnes. Il est des bouffées agréables d'air descendant, produites par la présence des glaciers sur les hauteurs. Il est des brises de terre et des brises de mer dues aux variations de température du sol du rivage, pendant le jour et la nuit. Le soleil du matin, échauffant la terre, détermine un déplacement vertical d'air, que l'air plus froid de la mer vient compenser en soufflant vers la terre. Le soir, la terre est plus refroidie par le rayonnement que les eaux de la mer, et les conditions sont interverties : c'est l'air plus froid et plus lourd des côtes qui souffle alors vers la mer. » (Tyndall.)

Les vents, comme on voit, ont tous pour origine première la chaleur du Soleil, qui s'exerce inégalement dans les diverses régions de la surface du sol terrestre, suivant la position de l'astre, position qui d'ailleurs varie sans cesse avec l'heure du jour et l'époque de l'année. La rotation et la translation de la Terre concourent donc avec la radiation calorifique solaire pour déterminer les courants atmosphériques. Ainsi se dépense sous forme de mouvement sensible une partie de la puissance mécanique que recèlent les ondulations éthérées émanant du Soleil.

Ce n'est pas tout. Les alternatives d'échauffement et de refroidissement du sol et des masses atmosphériques produisent tantôt une évaporation de l'eau des mers, des rivières et des lacs, tantôt une condensation de la vapeur d'eau que contient l'atmosphère. Les vésicules qui forment les nuages, refroidies, se réunissent en gouttes que leur poids précipite à la surface du sol, et l'on a la pluie. Se refroidissent-elles plus encore, elles se congèlent et tombent sous forme de neige, s'accumulant principalement sur les sommets des montagnes. Dans les hautes

régions, les neiges forment les glaciers. La chaleur du Soleil liquéfie de nouveau l'eau congelée dans les champs de neige et les glaciers; les ruisseaux et les sources descendent sous l'influence de la pesanteur, se réunissent avec les eaux des pluies, forment les rivières et les fleuves, et retournent ainsi dans l'Océan, d'où la chaleur du Soleil les avait fait sortir.

Ainsi la circulation des eaux comme celle des masses aériennes, ces mouvements incessants si indispensables à l'entretien de la vie à la surface du globe, puisent la force qui leur donne naissance en partie dans la puissance mécanique de la chaleur solaire, en partie dans la gravité de la masse terrestre.

D'autres courants liquides, ceux qui sillonnent les mers, depuis l'équateur jusqu'aux pôles, sont produits de la même façon : les températures inégales donnent lieu à d'inégales dilatations et à des mouvements ascendants et descendants des couches liquides; l'évaporation produit un effet inverse en augmentant le degré de salure dans les points où la chaleur la rend plus forte, c'est-à-dire dans les régions de la zone équatoriale : de là des différences dans la densité et des mouvements ou courants qui en sont la conséquence.

La quantité de mouvement engendrée ainsi d'une manière continue par la chaleur solaire à la surface du globe terrestre est immense. Elle ne se borne point à la circulation aérienne, fluviale et océanique, ou, du moins, cette circulation même donne lieu à des modifications incessantes dans la croûte solide du globe. Une dégradation lente et continue des roches, des transports de matière, sables, graviers, terres, change d'année en année, de siècle en siècle, la forme des rivages, le relief des collines et des montagnes. Et c'est encore la puissance mécanique de la chaleur solaire qui est la cause première de ces transformations.

La force vive de la radiation solaire, outre les transformations que nous venons d'indiquer, en subit d'autres encore, qui, comme on va le voir, pour être moins directement utilisables sous forme de travail, n'en contribuent pas moins à

enrichir notre planète d'une source continue de mouvements de toute nature. N'avons-nous pas vu, en effet, que c'est la lumière solaire qui, par son action sur les parties vertes des plantes, décompose le gaz acide carbonique de l'air, fixe le carbone dans la substance végétale et élimine l'oxygène? On peut donc dire que le règne végétal a pour condition première de son existence la force vive des radiations solaires qu'il absorbe, soit sous forme de chaleur, soit sous forme de lumière ou d'activité chimique. D'ailleurs, sans les végétaux, la vie animale ne pourrait subsister à la surface de la Terre, ni par conséquent celle de l'homme. Ainsi, les radiations solaires sont bien la cause principale de toute la puissance accumulée dans les muscles des animaux et des populations humaines; là est la source incessamment et périodiquement renouvelée du mouvement, de la puissance, de la vie. D'ailleurs non seulement les générations actuelles profitent de la prodigieuse quantité de force que le Soleil verse annuellement sur la Terre, sous forme d'ondulations calorifiques, chimiques et lumineuses; mais elles consomment encore la réserve qu'ont accumulée les siècles. Que sont, en effet, les couches de houille ensevelies sous terre par les évolutions géologiques, sinon le produit de la force vive des radiations solaires qui s'est condensée, il y a quelques millions d'années, en forêts gigantesques? Le carbone provenant des arbres qui constituaient ces forêts, transformé par une sorte de distillation lente, s'aggloméra d'abord en tissu tourbeux, puis en roches de compacité croissante, jusqu'à ce que les couches de détritus végétaux fussent totalement transformées en lits de houilles fossiles. Aujourd'hui, dans les usines, les locomotives et les machines des steamers, ces précieux fossiles rendent à l'homme, en lumière[1], en chaleur et finalement en force mécanique, tout ce qu'ils avaient accaparé,

1. « En parlant de la houille, dit M. Jacquin dans son ouvrage sur *les Machines à vapeur*, on a dit que nous nous chauffions au Soleil des anciens jours; nous pouvons dire qu'avec cette même houille nous retrouvons une lumière (celle que donnent les machines magnéto-électriques) qui ne peut être comparée qu'à celle du Soleil lui-même, » et c'était le cas d'ajouter : une puissance motrice en rapport avec l'intensité de la source première.

il y a des milliers de siècles, de la puissance contenue dans la radiation solaire.

§ 6. ENTRETIEN DE LA RADIATION SOLAIRE.

Une seconde question que la nouvelle théorie de la chaleur permet d'envisager sous un jour tout nouveau, est celle qui se rapporte, sinon à l'origine de la puissance vive de la radiation solaire, du moins à sa conservation ou à son entretien dans la série des temps écoulés, comme dans celle des siècles à venir. Comme toute dépense de chaleur et de lumière est une perte réelle, une diminution pour le foyer d'où partent les rayons, il est de toute évidence que, si rien ne vient entretenir l'activité de la combustion ou de l'incandescence dont la masse solaire est le foyer, la dépense énorme qui est la conséquence de son rayonnement dans l'espace n'étant pas compensée, l'énergie de ses radiations diminuant progressivement, un moment doit arriver où le foyer sera complètement éteint.

Et d'abord, d'après les données que l'on possède sur le rayonnement solaire, peut-on dire de combien sa température s'abaisse, en une année, en un siècle, en une période quelconque? Pouillet s'est posé ce problème ; mais il a montré en même temps que la solution est pour nous indéterminée. Il faudrait, pour le résoudre, connaître deux éléments de la constitution physique du Soleil, la conductibilité de la substance dont son globe se compose, ainsi que sa chaleur spécifique ; or nous ignorons la valeur exacte de chacun de ces éléments ; nous ne pouvons que la supposer. Dans l'hypothèse d'une conductibilité parfaite, et en admettant que la chaleur spécifique du Soleil soit 135 fois celle de l'eau, Pouillet est arrivé à cette conséquence que la température du Soleil s'abaisserait de $\frac{1}{100}$ de degré par année, ou de 1 degré par siècle. En 10000 ans, le refroidissement total serait donc de 100 degrés[1].

1. Nous n'avons pas besoin de dire que ces nombres sont sans doute fort éloignés de la

Maintenant, le Soleil s'est-il réellement refroidi depuis les temps historiques? Rien, à notre connaissance, ne témoigne d'un pareil phénomène dans les quelques milliers d'années dont l'homme a conservé le souvenir. Peut-être, un jour, l'histoire du passé de notre planète pourra jeter quelque lumière sur la question ainsi posée; mais il ne faut pas perdre de vue qu'un changement démontré des climats, ou de la température moyenne de la Terre, peut être attribué aussi bien à des modifications terrestres qu'à une variation dans l'intensité du rayonnement solaire : le problème sera donc toujours très complexe.

Ce qu'il est permis d'affirmer, c'est que depuis plusieurs milliers d'années aucune diminution appréciable ne s'est fait sentir dans cette intensité, et dès lors il faut supposer nécessairement, ou que le refroidissement est beaucoup plus lent que ne l'exige la solution, d'ailleurs hypothétique, de Pouillet, ou bien que la chaleur du Soleil est entretenue par des moyens dont il reste à chercher la nature. Nous venons de voir qu'au cas où il ne réparerait point ses pertes, il se refroidirait de 100° en cent siècles; mais cela suppose une chaleur spécifique énorme, et si cette chaleur spécifique ne dépasse point celle de l'eau, ce n'est plus de 100°, mais de 14000° qu'il se refroidirait dans cette même période : c'est-à-dire que sa radiation se trouverait entièrement éteinte.

« Aucune des combustions, aucune des affinités chimiques que nous connaissons, dit Tyndall, ne pourrait entretenir la radiation solaire. L'énergie chimique de ces substances serait trop faible, et elles se dissiperaient trop vite dans l'espace. Si le Soleil était un bloc de houille, et qu'on l'approvisionnât assez d'oxygène pour le rendre capable de brûler au degré

vérité. Si la masse du Soleil est gazeuse, sa chaleur spécifique sous la pression ordinaire pourrait être rapprochée de celle de l'hydrogène, qui est environ 3,4, nombre bien inférieur à 133. D'un autre côté, la haute température du Soleil doit augmenter cette chaleur spécifique. Enfin, sa conductibilité, loin d'être parfaite, est probablement très faible, ainsi qu'on l'a vu pour celle des gaz en général. Avec des données aussi incertaines, il n'est vraiment pas permis de conclure, et Pouillet n'a voulu que donner une idée de la façon dont le problème pouvait être abordé.

qu'exige la radiation mesurée, il serait entièrement consumé au bout de 5000 ans. »

La question reste donc entière, et il faut se demander comment s'entretient ce foyer prodigieusement intense, dont la masse, quelque énorme qu'elle soit, ne suffit pas à expliquer l'incandescence permanente pendant la série des siècles, tant qu'on le considère simplement comme un corps dont la combustion ne trouve d'aliment que dans sa propre substance.

Diverses hypothèses ont été proposées et discutées. Passons-les rapidement en revue :

On a dit que, le Soleil tournant sur son axe en 25 jours, il doit résulter de ce mouvement un frottement de sa surface contre le milieu où il se meut, puis, par la transformation de ce frottement, un dégagement de chaleur et de lumière. Mais quelle est la matière qui presserait ainsi comme un frein la périphérie du globe solaire? Est-ce l'éther? Une telle supposition est évidemment inadmissible. Car l'action de ce milieu se ferait sentir avec une énergie bien autrement grande sur les planètes, dont le mouvement de rotation et surtout le mouvement de translation sont beaucoup plus rapides. On a calculé d'ailleurs, que si toute la force de rotation du Soleil était convertie en chaleur, elle suffirait à compenser la radiation pendant plus d'un siècle; mais aussi elle serait complètement dépensée en moins de deux siècles. Il n'y a donc pas à tenir compte de cette hypothèse, à la fois complètement insuffisante et en contradiction avec les observations qui n'indiquent depuis deux siècles aucune diminution dans la vitesse de rotation de l'astre.

Une seconde opinion, brillamment soutenue par Mayer, Waterston[1], Thomson, est celle qui explique l'entretien de la radiation solaire par la chute des météores à la surface du Soleil. C'est à sir W. Thomson qu'on doit le développement le plus complet de cette théorie. En voici le résumé.

1. Voir Mayer, *Dynamik des Himmels;* Waterston, *Séances de l'Association britannique*, 1853; W. Thomson, *Transactions de la Société d'Édimbourg pour* 1854.

Autour du Soleil circulent ou gravitent une multitude de corps. Les uns, comme les planètes actuellement connues, décrivent des orbites dont les grands axes ont des dimensions à peu près invariables, au moins depuis les temps historiques. On sait même, par la théorie des perturbations réciproques qu'elles exercent les unes sur les autres, que cette invariabilité est assurée pour de longues séries de siècles : ce qui prouve que le milieu où elles se meuvent oppose une résistance à peu près nulle à leurs mouvements. Outre les planètes, dont le nombre actuel dépasse 230, il y a une multitude de comètes, probablement des millions, qui décrivent des orbites beaucoup plus allongées, et dont les masses, comparativement très petites, peuvent éprouver du milieu où elles se meuvent une résistance sensible. La comète d'Encke, par exemple, se rapproche sensiblement du Soleil, à mesure que la durée de sa période diminue ; et si cette accélération continue, un jour viendra où l'astre, après avoir décrit une spirale, ira se plonger dans la fournaise ardente. D'autres corpuscules, en beaucoup plus grand nombre encore, circulent constamment autour de l'astre : ce sont ceux qui nous apparaissent par essaims à certaines époques de l'année, qui, frôlant l'atmosphère de la Terre avec la vitesse des planètes, s'y enflamment et quelquefois tombent à sa surface. Ces essaims, dont les traînées ont été récemment assimilées, sinon identifiées avec les masses cométaires, paraissent décrire, les uns des courbes paraboliques indiquant qu'ils viennent pour la première fois peut-être visiter nos parages solaires, les autres des ellipses plus ou moins allongées. Peu à peu ces masses individuellement très petites, subissant la résistance du milieu qui accélère le mouvement de la comète d'Encke, se rapprochent du Soleil, et, faisant nombre, accroissent par leur adjonction la densité et la résistance de ce milieu même : leur accumulation produirait autour du Soleil une sorte de nébuleuse. Telle serait la cause de cette lueur connue sous le nom de *lumière zodiacale*, dont le plan coïncide à peu de chose près avec le plan de l'écliptique ou de l'équateur

solaire, et qui s'étend à une distance de l'astre au moins égale à la distance moyenne de la Terre.

Toute cette matière, ou plutôt ces courants de matière météorique circulent autour du foyer, dont elles réfléchissent la lumière ; mais en même temps, par leurs chocs, par la résistance qu'elles opposent les unes aux autres à leurs propres mouvements, peu à peu la vitesse de translation s'accélère, et l'on conçoit qu'il en résulte un écoulement incessant vers le Soleil, une pluie de météores à la surface de l'astre.

Une telle chute est de nature, si vraiment elle existe, à fournir un aliment continu à la radiation calorifique et lumineuse du Soleil. D'une part, c'est pour celui-ci un accroissement de substance, des éléments de combustion ajoutés à ceux qu'il possède déjà. D'autre part, et c'est là que serait, d'après les auteurs cités plus haut, la vraie, la principale cause de l'entretien de la radiation du Soleil, la chute de chaque météore détermine par la simple transformation de sa vitesse acquise, une chaleur énormément plus considérable que celle due à la combustion de sa masse. Laissons, sur ce point, la parole à Tyndall :

« Il est aisé de calculer, dit-il, le maximum et le minimum de la vitesse communiquée par l'attraction du Soleil à un astéroïde qui circule autour de lui ; le maximum est engendré lorsque le corps s'approche en ligne droite du Soleil, venant d'une distance infinie, puisque alors la force entière de l'attraction s'est exercée sur lui sans perte aucune ; le minimum est la vitesse qui serait simplement capable de faire tourner autour du Soleil un corps tout à fait voisin de sa surface. La vitesse finale du premier corps, au moment où il va frapper le Soleil, serait de 627 kilomètres par seconde, celle du second de 444 kilomètres. L'astéroïde, en frappant le Soleil avec la première vitesse, développerait plus de 9000 fois la chaleur engendrée par la combustion d'une masse égale de houille[1]. Il

1. Voici, d'après W. Thomson, quelles seraient les quantités de chaleur développées par chacune des huit principales planètes, au cas où elles viendraient à tomber en ligne droite

n'est donc nullement nécessaire que les substances qui tombent sur le Soleil soient combustibles; leur combustibilité n'ajouterait pas sensiblement à l'épouvantable chaleur produite par leur collision ou choc mécanique.

« Nous avons donc ici un mode de génération de chaleur suffisant pour rendre au Soleil son énergie à mesure qu'il la perd, et pour maintenir à sa surface une température qui surpasse celle de toutes les combinaisons terrestres. Les qualités propres des rayons solaires et leur pouvoir de pénétration incomparable nous autorisent à conclure que la température de leur origine doit être énorme; or nous trouvons dans la chute des astéroïdes les moyens de produire cette température excessive. On peut objecter que cette pluie de matière devrait être accompagnée d'un accroissement dans le volume du Soleil; cela est vrai, mais la quantité de matière nécessaire à produire la radiation observée, quand même elle se serait accumulée pendant quatre mille ans, échapperait entièrement à l'examen fait avec nos instruments les plus puissants. Si la Terre tombait sur le Soleil, l'accroissement de volume qu'elle produirait serait tout à fait imperceptible; et cependant la chaleur engendrée par son choc couvrirait la dépense faite en un siècle par le Soleil. » (*La Chaleur.*) La chute de la Lune couvrirait les pertes d'une ou deux années, mais son volume n'est que la soixante-quatre-millionième partie du volume du Soleil[1].

Telle est l'hypothèse de la *Théorie météorique de la chaleur*

sur le Soleil; ces quantités sont exprimées par les temps pendant lesquels elles pourraient entretenir la radiation solaire :

	Ans.	Jours.		Ans.
Mercure	6	214	Jupiter	32240
Vénus	83	227	Saturne	9650
La Terre	94	303	Uranus	1610
Mars	12	252	Neptune	1890

Ainsi, toutes les planètes réunies, tombant sur le Soleil, entretiendraient sa chaleur pendant 45 588 ans!

1. D'ailleurs, si le Soleil, en recevant incessamment des météores, augmente de volume et de masse, d'autre part, son incessante radiation, abaissant incessamment aussi sa température, doit déterminer de ce chef une contraction dans son volume; de sorte que la compensation qui s'opère au point de vue de son énergie lumineuse et calorifique, peut exister aussi sous le rapport du volume. Sa masse et sa densité s'accroîtraient d'une façon continue.

solaire, hypothèse fort ingénieuse, et physiquement très vraisemblable, puisqu'elle s'appuie sur un fait-principe qui a décidément aujourd'hui droit de cité dans la science, c'est-à-dire sur la transformation du mouvement mécanique en chaleur. Sir W. Thomson a toutefois abandonné cette théorie comme incompatible avec certains faits scientifiques parfaitement constatés. L'augmentation de la masse solaire, provenant d'une chute de météorites assez abondante pour rendre compte de l'entretien de la radiation, aurait influé sur la durée de notre année, en la raccourcissant. Les anciennes observations astronomiques sont incompatibles avec cette hypothèse. Il est vrai que cette incompatibilité n'existe plus, si l'on admet que les météores n'ont pas une origine extra-planétaire, et que depuis de longs temps ils circulent dans le voisinage du Soleil. La difficulté est de concilier cette nouvelle manière de voir avec les observations qui montrent certaines comètes s'approchant du Soleil à des distances de la surface moindres que son rayon, sans éprouver, dans ce passage, de perturbations sensibles, ce qui prouverait l'impossibilité de l'existence d'un milieu résistant environnant le Soleil. On pourrait répondre, il est vrai, que ce milieu n'est pas indispensable à la théorie, puisque la même cause qui accélère le mouvement de la comète d'Encke, — et cette accélération est un fait d'observation parfaitement établi, ainsi que celle de la comète de Faye — peut précipiter à la longue sur le Soleil les courants météoriques.

Quoi qu'il en soit, si, malgré ces objections, l'hypothèse de l'entretien de la chaleur solaire par la chute des météores était admise comme vraie, on pourrait en déduire une conséquence qui, selon nous, mérite l'examen. Elle nous est suggérée par la théorie qu'un astronome contemporain, M. Schiaparelli, a proposée pour l'origine des courants périodiques de météores. Selon ce savant, cette origine est extérieure au système solaire, comme celle d'un certain nombre de comètes : ce sont des masses nébuleuses que la force d'attraction du Soleil entraîne dans sa sphère d'activité, qui viennent ainsi, des profon-

deurs des espaces interstellaires, décrire une hyperbole autour du foyer de notre monde et, après avoir défilé en longues traînées, pendant plusieurs années successives, retournent aux distances d'où elles étaient venues; les unes échappent ainsi peut-être, après une révolution, à la gravitation du Soleil; les autres, déviées de leur première orbite par la rencontre des planètes, transforment leur route hyperbolique en route elliptique et enrichissent définitivement le système solaire. S'il en est ainsi, si l'on songe en outre que le Soleil voyage lui-même dans une immense orbite dont le foyer est inconnu, on peut se représenter l'immense masse incandescente comme ravageant l'espace au profit de sa puissance, semblable aux baleines qui parcourent et dépeuplent l'Océan. Dès lors, pour l'entretien de son activité rayonnante, il n'est plus réduit au menu fretin qui existe à un moment donné dans son voisinage, et l'on comprend qu'à mesure qu'il engloutit des légions de météores, d'autres provisions se font pour l'avenir, et ainsi de suite pour un temps indéfini.

Il nous reste maintenant, pour achever ce que nous avons à dire de l'entretien de la radiation solaire, à exposer la théorie qui explique cet entretien par la transformation en chaleur de la force de gravitation qui a condensé en un seul noyau les molécules de la nébuleuse primitive. A l'origine, ces molécules, relativement très distantes les unes des autres, mais douées de la force de gravitation propre à toute matière, formaient en fait une masse chaotique ou confuse. Peu à peu, sous l'influence de la gravitation, elles se sont condensées en un noyau qui est devenu le centre prépondérant d'attraction de toute la masse. « Les molécules de la nébulosité se précipitant ainsi les unes sur les autres, dit Balfour Stewart, de la chaleur a été produite, précisément comme, quand une pierre est lancée avec force du haut d'un précipice, la chaleur est aussi la forme dernière en laquelle se convertit l'énergie potentielle de la pierre. » Cette théorie ne diffère pas essentiellement, comme on voit, de la précédente. C'est toujours la transformation d'un certain tra-

vail en chaleur qui sert à expliquer la radiation solaire. Cette précipitation continue des molécules suffit à rendre compte de la constance de la radiation ou de son entretien apparent pendant un temps qui nous paraît indéfini, mais dont on peut chercher à calculer la durée. Si l'hypothèse que nous exposons est exacte, la masse du Soleil se condense et ce volume diminue. La chaleur fournie par cette condensation est telle, que, si le diamètre du Soleil diminuait de la millième partie de sa valeur, elle suffirait à maintenir la constance de l'énergie de la radiation actuelle pendant 23 000 années.

Helmholtz, l'auteur de ce dernier calcul et de la théorie que nous venons d'exposer, a calculé « que nous ne possédons que la 454ᵉ partie de la force originelle sous forme mécanique et que le reste a été changé en chaleur : cette chaleur serait capable d'élever de 28 millions de degrés la température d'une masse d'eau égale à la masse totale du Soleil et des planètes. » Si toute cette masse était convertie en houille et consumée, elle ne dégagerait que la 3500ᵉ partie de la chaleur de 28 millions de degrés.

La vitesse du mouvement d'un projectile étant connu, ainsi que sa masse, on peut calculer la quantité de chaleur qui résulterait de la destruction de ce mouvement. Helmholtz a fait ce calcul pour la Terre, considérée comme un immense projectile lancé autour du Soleil avec la vitesse moyenne de 30 kilomètres par seconde, et qu'un choc soudain réduirait au repos. « Si notre globe était tout à coup arrêté, dans sa course autour du Soleil, par un choc, il en sortirait, dit-il, autant de chaleur que pourrait en dégager une masse de charbon égale à quatorze fois la masse de la Terre. En admettant pour la Terre la capacité calorifique la moins favorable, c'est-à-dire la plus forte, celle de l'eau, sa masse prendrait par suite de ce choc une température de 11 200 degrés : elle serait donc fondue entièrement, une grande partie serait même vaporisée. La Terre une fois arrêtée tomberait nécessairement sur le Soleil, et ce nou-

veau choc donnerait naissance à une quantité de chaleur 400 fois plus considérable[1]. »

La chaleur engendrée par l'extinction du mouvement de rotation de notre planète serait elle-même considérable. Thomson a calculé qu'elle suffirait à entretenir la radiation solaire pendant 81 jours. Un arrêt subit du mouvement de rotation aurait donc pour conséquence une telle élévation de température, que la masse entière de la Terre serait réduite en vapeur.

1. *Exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles.*

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

LE CHAUFFAGE

§ 1. ANCIENS PROCÉDÉS DE CHAUFFAGE.

Parmi les intempéries qui peuvent nuire à la santé de l'homme et lui interdire, dans une certaine mesure, le libre exercice de ses facultés physiques ou intellectuelles, les brusques variations des températures, les extrêmes du froid et de la chaleur, sont de celles qui l'affectent davantage et contre lesquelles il lui importe le plus de se prémunir. Les régions de la Terre où règne, selon l'expression consacrée, un printemps perpétuel, sont rares; en tout cas, elles sont peu peuplées. Même dans les zones tempérées, il existe un écart notable entre les chaleurs de l'été et les froids de l'hiver. De plus, à mesure que la civilisation envahit des espaces de plus en plus grands du nouveau et de l'ancien continent, les voyages se multiplient, la colonisation peuple des contrées nouvelles, et l'homme se trouve exposé à vivre dans des milieux où les excès de température, s'ils ne sont pas combattus dans leurs

effets, rendent pour lui l'acclimatation difficile et sont, en tout cas, dangereux pour sa santé.

De là l'obligation de combattre ces effets, qu'ils soient funestes ou simplement désagréables, par des moyens appropriés, et de régler l'usage de ceux-ci selon les lois de la physique et de l'hygiène.

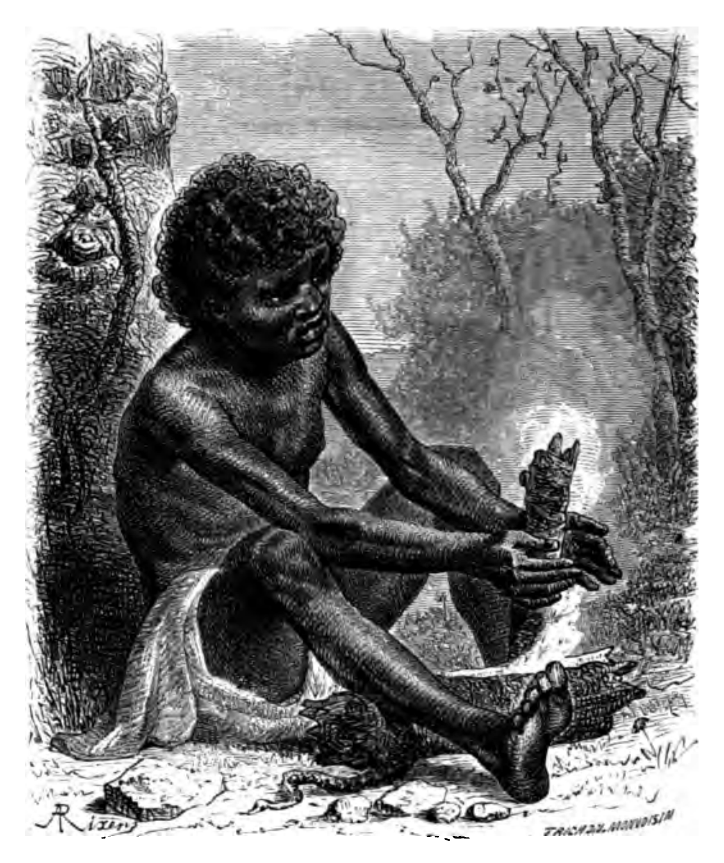


Fig. 196. — Sauvage faisant du feu.

Ces moyens sont de diverses natures. Ils s'appliquent aux habitations, aux vêtements, même à la nourriture et aux boissons; et il est clair qu'on peut les classer en deux catégories principales, selon qu'ils ont pour objet de combattre l'excès du froid ou l'excès de la chaleur.

Parlons d'abord du chauffage, qui est surtout une nécessité pour les habitants des zones glaciales et tempérées.

Le moyen le plus naturel, le plus primitif de se préserver du froid est d'allumer un feu, aux rayonnements duquel on s'expose directement. Nos ancêtres des âges de la pierre n'en connaissaient sans doute pas d'autres ; ils allumaient en plein air des feux qui servaient à la cuisson de leurs aliments, comme font encore, non seulement beaucoup de peuplades sauvages, mais nos soldats lorsqu'ils sont en campagne. Toutefois il y eut dès le début un progrès notable dans ce mode de chauffage : c'est celui qui a consisté à mettre le foyer à l'abri dans les premières habitations humaines, dans les cavernes, puis de là dans les huttes construites de bois et de branchages ou de pierres.



Fig. 197. — Brasero.

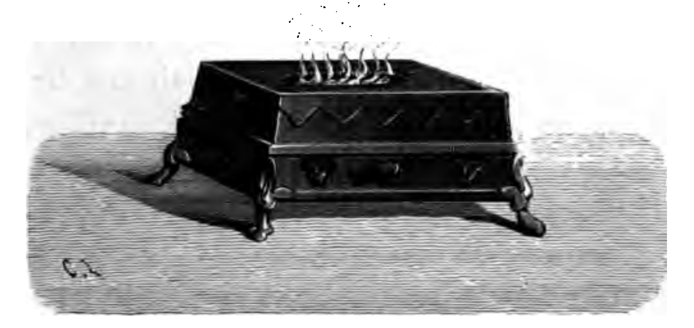


Fig. 198. — Foculus des Romains.

Combien de temps s'écoula-t-il avant qu'on connût les cheminées? Bien des siècles sans doute, et la fumée s'échappait au dehors de la hutte, soit par l'unique ouverture qui en formait la porte et les fenêtres, soit, comme chez les Gaulois, les Germains et, aujourd'hui même, chez les Esquimaux, les habi-

tants de la Terre de Feu, les tribus des Veddahs de l'intérieur de Ceylan, et vingt autres peuplades à demi sauvages, par un trou pratiqué à la partie supérieure du toit.

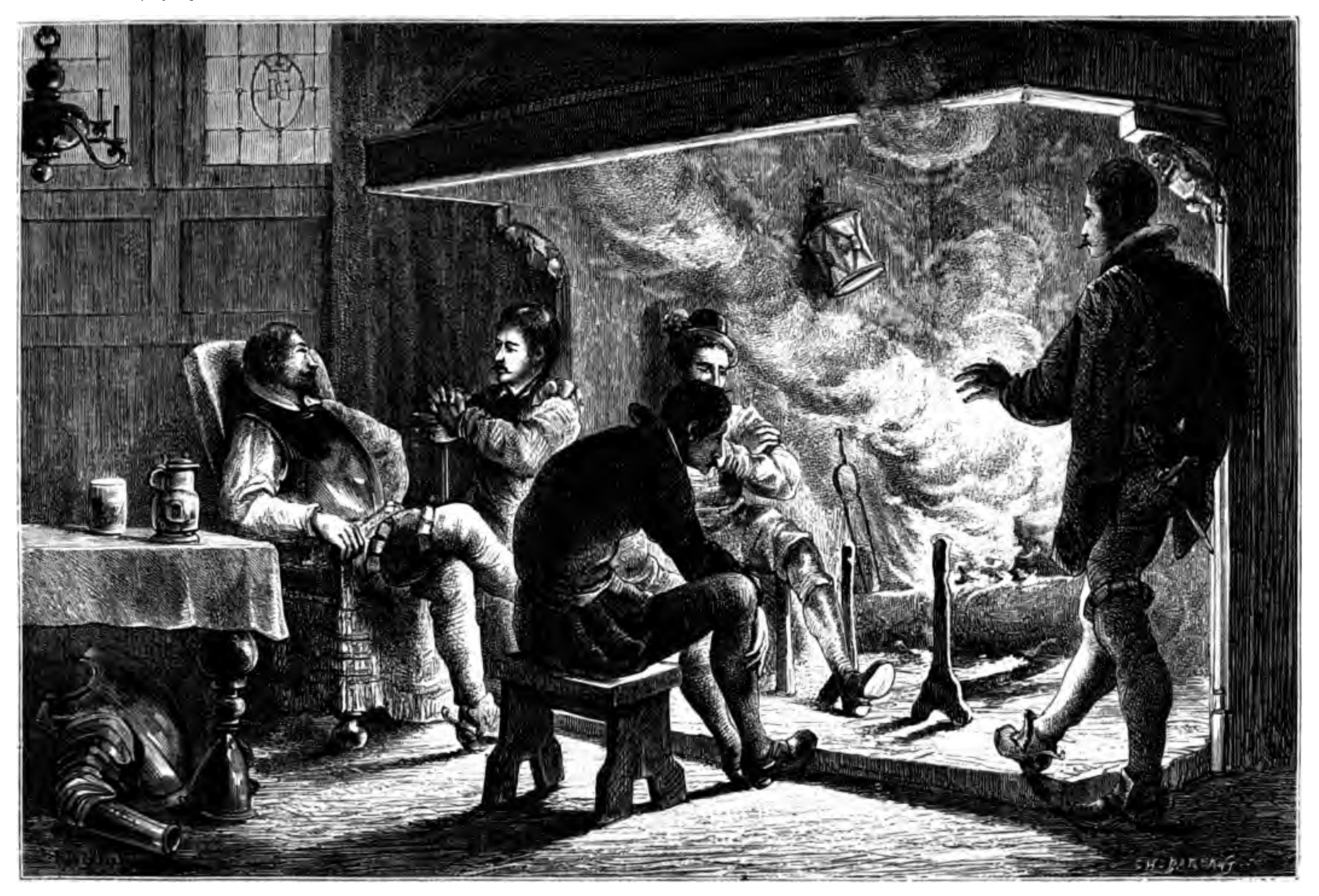
Mais nous ne voulons point faire ici l'histoire des progrès du chauffage ni rechercher si les anciens, Romains ou Grecs, connaissaient les cheminées, ou si ces utiles appareils n'ont fait leur apparition qu'au moyen âge dans les habitations occidentales. Que des innovations, qui nous paraissent aujourd'hui si simples, aient tant tardé à se produire, cela n'a rien d'extraordinaire, si l'on songe que la civilisation actuelle s'est propagée du midi et de l'orient vers l'occident et vers le nord. Les Grecs



Fig. 199. — Le chauffage chez les anciens. Trépieds des Grecs.

passaient une grande partie de leur vie en plein air, et le doux climat des îles de l'Archipel et de la péninsule Hellénique n'exigeait pas de précautions exceptionnelles contre le froid de la saison hivernale. On se contentait d'adoucir la température des habitations en plaçant sur des trépieds des brasiers formés de charbons allumés sous la cendre chaude, moyen de chauffage qui n'était ni bien efficace, ni bien hygiénique. On retrouve encore dans les pays méridionaux, en Grèce, en Italie, en Espagne, sous le nom de *braseros*, les *trépieds* des Grecs et les *foculi* des Romains.

Arrivons donc aux appareils de chauffage usités dans les temps modernes, et commençons par les *cheminées*.



UNE CHEMINÉE AU MOYEN AGE.

§ 2. CHAUFFAGE PAR LES CHEMINÉES. — ANCIENNES CHEMINÉES ET CHEMINÉES ORDINAIRES.

C'est encore le mode de chauffage le plus généralement employé en France. Le foyer où a lieu la combustion est formé d'une cavité pratiquée le plus ordinairement dans l'un des murs principaux ou de refend de l'habitation. Il est surmonté d'un conduit cylindrique ou prismatique par lequel s'échappent la fumée et les autres gaz produits par la combustion, et dont l'orifice extérieur s'élève au-dessus des toits.

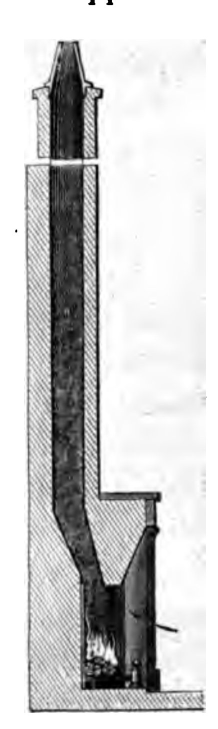


Fig. 200. — Tirage dans une cheminée ordinaire.

Dans les cheminées ordinaires, la combustion se fait aux dépens de l'air de la chambre, qui perd ainsi son oxygène, et dès lors a besoin d'être sans cesse renouvelé. Ce renouvellement a lieu grâce à un phénomène que nous connaissons tous sous le nom de *tirage*. Ce n'est autre chose qu'un mouvement ascendant de l'air et des gaz chauds qui s'échappent du foyer. Au début, quand on allume le feu, l'air extérieur, celui qui remplit le conduit de la cheminée et l'air de la chambre sont en équilibre. La chaleur du feu échauffe les couches d'air inférieures qui deviennent moins denses, et dès lors tendent à s'élever et s'élèvent en effet. L'air plus froid des couches supérieures comble le vide déterminé par cette ascension, et produit d'abord un courant descendant plus énergique que le courant ascendant : il arrive alors assez souvent que la fumée se trouve rabattue dans la chambre.

Mais, dès que la colonne d'air chaud s'est élevée jusqu'à l'orifice extérieur du tuyau de la cheminée et remplit tout le conduit, le courant ascendant vertical domine et le tirage exerce tout son effet, toutefois à une condition : c'est que l'air

de la chambre, à mesure qu'il cède son oxygène au foyer, soit constamment remplacé par de l'air nouveau. Si, pour une cause quelconque, ce remplacement ne pouvait s'effectuer, l'activité du tirage diminuerait peu à peu et, avec elle, l'activité de la combustion. Il en résulterait, d'une part, le rabattement de la fumée, et, d'autre part, la viciation de l'air de la chambre privé de son oxygène, remplacé par des gaz irrespirables ou toxiques, tels que l'acide carbonique et l'oxyde de carbone.

Le tirage est donc aussi utile à l'hygiène qu'au bon fonctionnement d'une cheminée.

Maintenant, comment remplit-on la dernière condition dont nous venons de parler? Où prend-on l'air nouveau pour remplacer celui qu'enlève à la chambre la combustion activée par le tirage?

Dans les anciennes cheminées, c'est par les fissures des portes et des fenêtres que se faisait cette introduction. Aussi presque toutes ces cheminées fumaient quand les ouvertures étaient bien closes, comme il devait arriver dans les habitations neuves. En tout cas, il y avait là un inconvénient grave, celui des courants d'air, qui affectaient désagréablement les personnes assises au coin du feu : personne n'ignore combien les *vents coulis* ont déterminé de rhumes ou d'affections rhumatismales; et à la vérité il ne manque pas aujourd'hui dans nos habitations de pièces où les cheminées, construites à l'ancienne mode, produisent les mêmes effets, c'est-à-dire l'alternative peu agréable et peu hygiénique de la fumée ou des courants d'air.

La construction d'une cheminée, d'après toutes les données de la science, est un art qui ne remonte pas bien haut. Sous Louis XIV, non seulement dans les habitations particulières, mais dans les palais du grand roi, on se chauffait mal en faisant de très grands feux. Pour éviter les vents coulis, on se servait de paravents; et cela ne suffisait pas toujours, puisque Louis XIV lui-même, pendant l'hiver, se tenait dans ses appar-

tements, calfeutré dans une sorte de caisse de voiture ou de siège qui ne laissait arriver l'air d'aucun côté. Du reste, comme nous allons le voir, ce n'est pas seulement le mode de tirage qui était défectueux; l'utilisation de la chaleur développée par la combustion était aussi mauvaise que possible.

Comment, en effet, un feu de cheminée chauffe-t-il l'air de la chambre et les objets qui s'y trouvent renfermés? Directe-

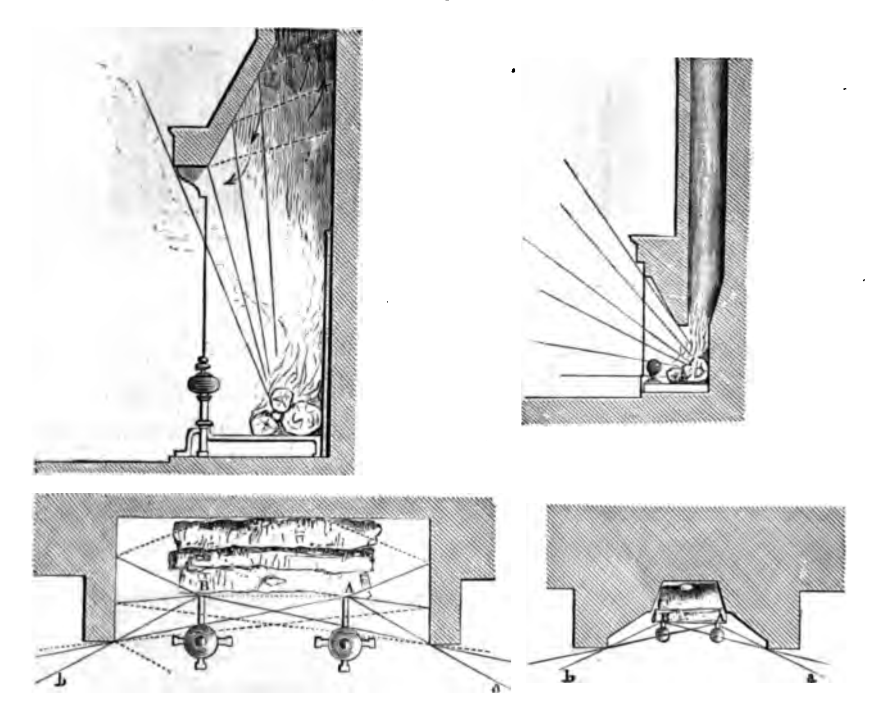


Fig. 201. — Ancienne cheminée. Utilisation et perte de chaleur.

Fig. 202. — Cheminée moderne. Rayonnement de la chaleur.

ment d'abord par le rayonnement de la flamme et des charbons incandescents. Or, dans les anciennes cheminées, où le foyer était au fond d'une vaste cavité carrée, limitée de chaque côté par des jambages, et à la partie supérieure par une hotte ou une tablette qui, les uns et les autres, faisaient obstacle au rayonnement, une faible partie des rayons de chaleur se trouvait utilisée. Aujourd'hui, ou mieux depuis Gauger[1] (1713) et

1. Auteur d'un ouvrage dont voici le titre : *La mécanique du feu ou l'Art d'en augmenter les effets et d'en diminuer la dépense; Traité de nouvelles cheminées qui échauffent plus que les cheminées ordinaires et qui ne sont point sujettes à fumer.* Paris, MDCCXIII.

Rumford, on avance le foyer de manière à donner un plus vaste champ au rayonnement direct. De plus, on limite l'intérieur des jambages par des surfaces disposées obliquement ou même de forme parabolique, en faïence polie ou en cuivre; de cette



Fig. 203. — Cheminée ordinaire moderne.

façon, les rayons qui n'ont pas accès direct dans la pièce sont renvoyés par réflexion et contribuent ainsi au chauffage.

L'ouverture de la cheminée est rétrécie par en haut au point où commence le tuyau de fumée, ce qui a le double avantage

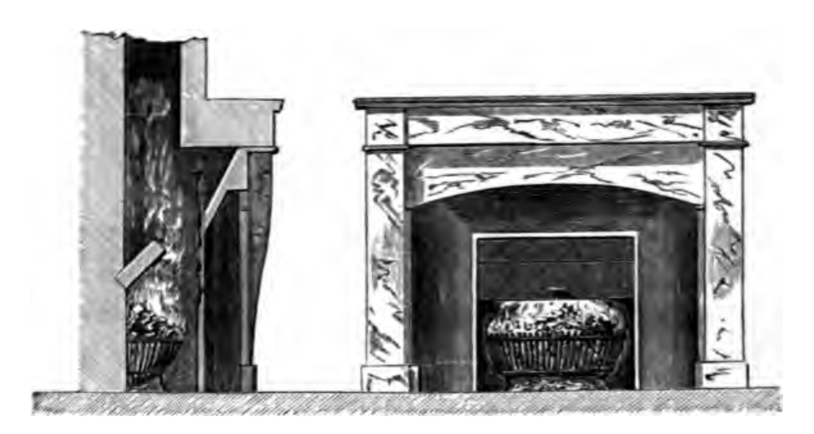


Fig. 204. — Cheminée moderne à tablier mobile.

d'activer le tirage et d'empêcher la fumée de se répandre dans la pièce. Cet effet est encore augmenté par l'usage de *tabliers mobiles*, pièces en tôle qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté au devant du foyer, et qui remplacent avantageusement le soufflet.

Le chauffage d'une pièce par une cheminée se fait non seulement par rayonnement, mais par convection, c'est-à-dire par le transport des parties échauffées qui montent vers le plafond et sont remplacées par l'air froid, incessamment appelé du dehors. De là résulte une ventilation naturelle, ordinairement plus que suffisante au point de vue hygiénique; mais aussi l'air nouveau, étant froid, doit sans cesse être échauffé par le foyer, dont la chaleur est ainsi mal utilisée. Comme, enfin, le conduit de fumée emporte une grande quantité des gaz chauds de la combustion[1], le rendement calorifique de ces cheminées est très faible, ce qui a conduit à des dispositions plus rationnelles et fait imaginer ce qu'on nomme les cheminées ventilatrices.

§ 3. LES CHEMINÉES VENTILATRICES.

Le principe des cheminées ventilatrices est celui-ci : au lieu d'appeler du dehors par les fissures des portes et fenêtres, ou même par des ventouses et des conduits latéraux, l'air nécessaire au tirage et indispensable au renouvellement de l'air vicié d'une chambre, il s'agit de ne laisser entrer l'air nouveau et

1. D'après le général Morin, l'air appelé par une cheminée en sort souvent à une température de 60, 80, 100 degrés et plus. La perte de chaleur s'élève aux $\frac{6}{7}$, aux $\frac{7}{8}$ et plus, de cette chaleur dispersée ; le rendement calorifique d'une cheminée ordinaire ne dépasse donc guère 14 centièmes, 12 centièmes de la chaleur développée par le combustible. D'après le même auteur, l'évacuation d'air déterminée par une cheminée ordinaire, de dimensions moyennes, fonctionnant avec une activité moyenne, atteint et dépasse souvent, par heure, cinq fois la capacité de la pièce qu'elle est destinée à chauffer. « Ce renouvellement d'air suffirait, dit-il, même dans les proportions ordinaires des appartements, pour assurer une ventilation de plus de 30 mètres cubes d'air par heure et par personne, en supposant qu'il y en eût plus d'une par mètre carré de plancher. D'une autre part, pour que le tirage et l'évacuation de la fumée aient l'activité nécessaire et ne soient pas contrariés par les vents, il suffit que la vitesse avec laquelle cette fumée s'échappe dans l'air soit de 3 mètres en une seconde dans le cas ordinaire d'un feu d'une activité moyenne; mais il n'est pas nécessaire et il serait même nuisible que la vitesse fût la même dans le tuyau général de fumée, où il convient qu'elle atteigne seulement 1^{m},40 à 2 mètres en une seconde, ce qui engage à ne pas trop restreindre les dimensions de ce tuyau. » (*Manuel pratique de chauffage et de ventilation.*) Le général Morin donne alors, dans une série de tableaux, les dimensions [illegible] celles des mitres qui les surmontent, calculées d'après la capaci[illegible] inées doivent chauffer et ventiler.

froid qu'après en avoir élevé la température à l'aide du foyer lui-même. On fait donc circuler l'air pris au dehors dans des conduits qui contournent le foyer, et, une fois échauffé, on le fait déboucher par des ventouses dans la pièce même, dont il contribue ainsi à élever la température.

Diverses dispositions ont été imaginées dans ce but. Nous reproduisons deux des plus simples :

Dans l'une (fig. 205), l'air arrive du dehors dans un conduit qui enveloppe entièrement le tuyau cylindrique en tôle de la fumée et aussi une partie du foyer ; il s'échauffe ainsi et s'élève jusqu'à une ouverture pratiquée près du plafond dans la cloison de la chambre. C'est donc à la fois de l'air chaud et de l'air nouveau non vicié, qui remplace l'air consommé par l'acte de la combustion ou entraîné par le tirage : la rentrée d'air froid par les fenêtres ou les portes se trouve ainsi à peu près supprimée.

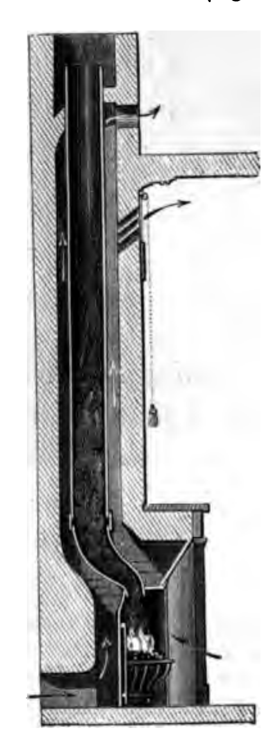


Fig. 205. — Cheminée ventilatrice de Douglas Galton[1].

Dans l'autre cheminée (fig. 206), le foyer est formé d'un appareil en fonte, et le conduit de la fumée se divise en plusieurs conduits par où passent les gaz chauds de la combustion. Tout l'appareil échauffe ainsi la capacité par laquelle arrive l'air du dehors, de sorte que celui-ci, en s'échappant par deux bouches de chaleur latérales, quand sa température est élevée par le contact des parois de l'appareil, contribue à la fois à chauffer l'appartement et à le ventiler. Le rendement calorifique des cheminées ventilatrices est notablement supérieur à celui des

1. Ce type de cheminée a été imaginé par le capitaine du génie D. Galton, pour le chauffage des casernes anglaises.

cheminées ordinaires. Il peut s'élever jusqu'à 35 pour 100 de la chaleur développée par le combustible.

Un autre avantage des cheminées ventilatrices, c'est que, comme elles s'alimentent elles-mêmes de l'air nécessaire au

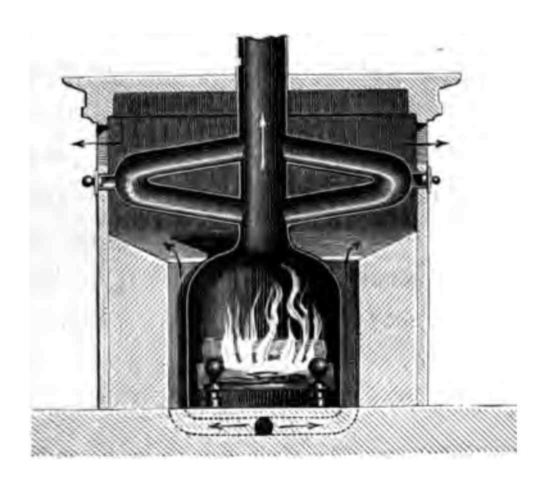


Fig. 206. — Cheminée ventilatrice; système Joly.

tirage, on peut sans inconvénient en placer deux dans une même pièce, lorsque les dimensions de cette pièce l'exigent. Cela n'est pas possible pour les cheminées ordinaires, qui se contrarieraient le plus souvent.

§ 4. LES POÊLES.

Les poêles ne diffèrent réellement des cheminées que par ce point : ce sont des appareils de chauffage installés au milieu de la pièce même qu'il s'agit de chauffer, au lieu d'être adossés ou mieux enchâssés dans la maçonnerie des murs. Il en résulte que l'échauffement de leurs parois se communique de tous côtés, par voie de rayonnement, à l'air de la pièce, et que la chaleur du foyer est ainsi beaucoup plus complètement utilisée. Le principe du tirage est le même; mais comme le foyer n'est visible que par une étroite ouverture, il n'y a presque pas de rayonnement direct de la flamme ni des charbons incandescents. Le tirage n'en est pas moins vif, au contraire; mais la

quantité d'air évacuée est relativement assez faible, de sorte que la ventilation est généralement insuffisante[1]. Hygiéniquement parlant, les poêles constituent un mode de chauffage inférieur aux cheminées; économiquement, ils sont au contraire plus avantageux.

La forme en est très variée, ainsi que la matière dont ils sont formés. Les poêles en fonte, grâce à la grande conductibilité du métal, s'échauffent très rapidement; les parois rougissent, et, outre la chaleur insupportable résultant de cette incandescence, des inconvénients graves en sont la conséquence. L'un de ces inconvénients provient de la haute température à laquelle l'air se trouve porté, de l'état de sécheresse qui en est la suite et qui affecte les organes de la respiration : on y remédie en plaçant un vase plein d'eau qui s'évapore lentement et fournit à l'air de la pièce l'humidité indispensable.

Un autre inconvénient plus grave a été signalé récemment. La chaleur rouge de la fonte détermine la formation d'un gaz, l'oxyde de carbone, qui est éminemment toxique, même quand il est mélangé à l'air dans une très faible proportion. Selon les uns, le métal incandescent devient perméable aux gaz de la combustion par un phénomène d'exosmose ou de dialyse étudié par divers savants, Graham, Henri Sainte-Claire Deville, etc.; selon d'autres, le gaz dont il s'agit est formé aux dépens des poussières organiques qui viennent se brûler au contact des parois du poêle, ou encore il provient de la décomposition de l'acide carbonique de l'air par le métal incandescent. Quelle que soit la cause de cette formation, le phénomène a été constaté, et avec lui, l'insalubrité des poêles en fonte, toutes les fois du moins que ces appareils sont chauffés au point de porter leurs parois au rouge.

Les poêles de brique, de faïence, de terre réfractaire, ou même

1. D'après le général Morin, le volume d'air évacué par le tirage d'un poêle n'est que d'environ 5 mètres cubes par kilogramme de bois brûlé, de 6 à 7 mètres cubes par kilogramme de houille. de 10 à 12 mètres cubes au plus par kilogramme de coke avec un feu très actif. L'évacuation de l'air vicié des appartements n'est donc guère supérieure au $\frac{1}{10}$ de la capacité des locaux chauffés, dont l'air ne peut ainsi se renouveler qu'une fois en dix heures.

les poêles métalliques revêtus intérieurement d'une paroi en terre contenant le foyer, n'ont pas cet inconvénient; ils s'échauffent d'ailleurs bien moins vite, à cause de la faible conductibilité de la matière de leurs enveloppes; mais d'autre part, pour la même raison, ils conservent longtemps la température à laquelle ils sont portés, et l'usage en est beaucoup plus hygiénique que celui des poêles en fonte, dont le prin-

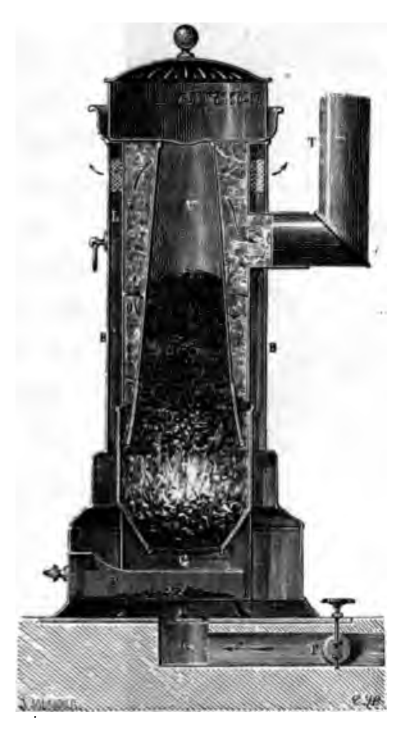


Fig. 207. — Poêle calorifère et ventilateur.

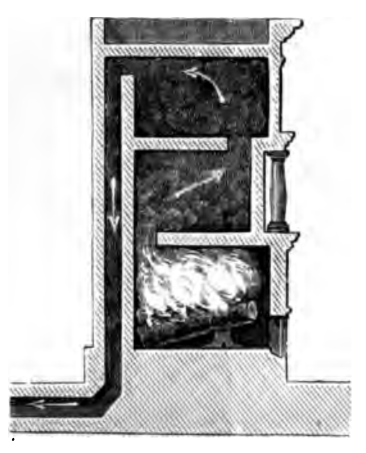


Fig. 208. — Coupe d'un poêle des pays du Nord.

cipal avantage est d'être plus économiques. Nous avons dit plus haut que la ventilation se fait beaucoup moins bien avec le chauffage des poêles qu'avec les cheminées. Leur rendement calorifique est aussi beaucoup plus considérable : il atteint 85 et 90 pour 100 de la chaleur développée par le combustible, tandis que la ventilation déterminée par le tirage est tout à fait insuffisante. On a vu plus haut que, selon M. Morin, l'air d'une chambre chauffée par un poêle se renouvelle au maximum une fois en dix heures.

La figure 207 représente un poêle calorifère, dont la disposition est fort avantageuse, au double point de vue de la ventilation et de l'utilisation du combustible. La ventilation y est assurée par un tuyau de prise d'air qui arrive au-dessous du foyer en A ; un robinet P permet de régler cette introduction d'air nouveau et par suite le tirage. La fumée, en s'échappant



Fig. 209. — Un poêle en Russie.

latéralement, chauffe l'air enfermé dans l'enceinte L, d'où cet air se répand par des ventouses latérales dans l'appartement. L'enveloppe B empêche en outre les effets nuisibles qui pourraient résulter de l'échauffement trop considérable des parois en fonte qui contiennent le combustible. La charge de charbon ou de coke se fait par en haut, en enlevant le couvercle supérieur.

Dans les pays du Nord, en Allemagne, en Russie, en Suède et en Norvège, les poêles sont de véritables monuments construits en briques et revêtus de faïence ou de porcelaine. La prise d'air (fig. 208) s'y fait extérieurement par un conduit qui pénètre dans le poêle et s'échauffe, avec l'air qu'il renferme, au contact des gaz chauds du foyer, pour se répandre ensuite, par des bouches de chaleur, dans l'appartement. D'autres fois, l'intérieur du poêle est simplement divisé en chambres ou compartiments superposés, à l'intérieur desquels circulent la fumée et les gaz de la combustion. C'est alors simplement par le rayonnement de l'enveloppe qu'a lieu le chauffage. Ordinairement il suffit de tenir le poêle allumé pendant quelques heures de la matinée, puis de fermer les ouvertures quand la masse tout entière du combustible est devenue incandescente : la faible conductibilité de la terre et de la faïence vernie qui forment l'enveloppe extérieure, maintient la chaleur de l'appareil pendant la journée tout entière.

CHAPITRE II

LE CHAUFFAGE — LES CALORIFÈRES

§ 1. LES CALORIFÈRES A CIRCULATION D'AIR CHAUD.

On doit réserver le nom de *calorifères* à des appareils de chauffage destinés à communiquer à distance la chaleur produite par la combustion du foyer et à la répandre dans un certain nombre d'appartements distincts du local où ils sont eux-mêmes installés. On compte trois systèmes principaux de calorifères.

Les uns ont une ressemblance plus ou moins grande avec les cheminées ventilatrices ou avec les poêles munis de chambres intérieures ou de bouches de chaleur, parce que c'est de l'air chaud qu'ils envoient dans les diverses pièces qu'ils ont pour objet de chauffer. Ce sont les *calorifères à air chaud*.

D'autres sont construits sur un autre principe. Le véhicule de la chaleur émanée du foyer est l'eau échauffée au contact de celui-ci et circulant dans des tuyaux qui la conduisent, dans l'épaisseur des murs, sur tous les points où il s'agit d'élever la température. Ce sont les *calorifères à circulation d'eau chaude*.

Enfin, il y a un troisième système de calorifères, où la chaleur empruntée au foyer est celle de la vapeur d'eau portée à l'ébullition ; en circulant dans des conduits, cette vapeur se refroidit, se condense et cède toute la chaleur qui provient de ce changement d'état aux corps qui environnent l'espace où

elle est renfermée ainsi que l'air en contact avec eux. Ce sont les *calorifères à vapeur d'eau.*

Passons successivement en revue les appareils de ces trois systèmes, en signalant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs.

Les foyers des calorifères à air chaud sont le plus souvent installés dans les caves des édifices qu'ils sont appelés à chauffer, au milieu d'une chambre dont l'air est renouvelé par une prise extérieure, mais qui n'est point en communication directe avec le foyer lui-même, de manière que la fumée ou les autres gaz de la combustion n'y aient aucun accès. Le conduit qui reçoit la fumée et ces gaz se replie plusieurs fois sur lui-même ou se divise en un certain nombre de conduits, tantôt horizontaux (fig. 210), tantôt verticaux, disposition qui a pour objet d'augmenter la surface de chauffe et d'utiliser ainsi autant que possible la chaleur développée par le combustible. Disons tout de suite qu'à cet égard les conduits verticaux sont beaucoup plus avantageux, parce que l'air chaud qui s'élève ne rencontre dans son mouvement que la moitié inférieure des parois des tuyaux horizontaux, tandis qu'il reste pendant tout le temps de son ascension en contact avec la surface entière des tuyaux verticaux[1].

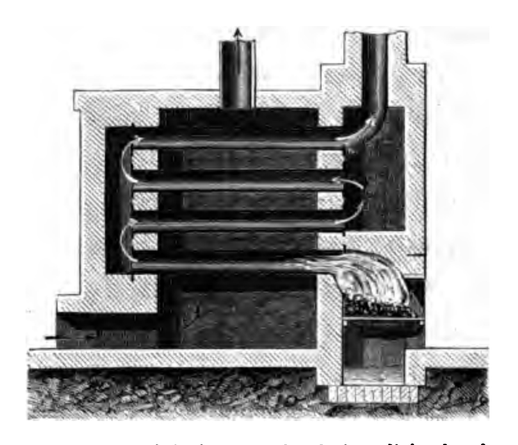


Fig. 210. — Calorifère à circulation d'air chaud.

1. « L'expérience a montré, en effet, qu'un calorifère à tuyaux horizontaux où la surface de chauffage était égale à 70 fois celle de la grille n'utilisait que 0,63 de la chaleur développée par le combustible, tandis que pour des calorifères à tuyaux verticaux, où la surface de chauffe était égale à 220 fois celle de la grille, le rendement calorifique s'est élevé à 0,81. La proportion de la surface de chauffe des tuyaux à celle de la grille a aussi une grande importance. » (Morin, *Manuel pratique du chauffage et de la ventilation.*)

Pendant que la fumée et les gaz de la combustion s'élèvent dans la cheminée après avoir cédé à la chambre du calorifère une grande partie de leur chaleur, l'air chaud de cette chambre s'élève dans un tuyau central qui se divise en plusieurs tuyaux. Chacun de ceux-ci va déboucher aux divers étages et dans les diverses pièces de l'édifice par des ouvertures qu'on peut fermer en totalité ou en partie. Le mélange de cet air avec celui de la pièce en élève la température, mais ne contribue point à la ventilation, si celle-ci n'est pas assurée d'une façon indépendante. Le rendement calorifique de ces appareils peut varier entre 60 et 80 centièmes.

L'air arrive souvent dans les appartements à une température trop élevée. Pour obvier à cet inconvénient, on le fait traverser, en sortant du calorifère, une capacité où arrive de l'air froid. Des ouvertures munies de registres permettent d'y opérer le mélange de façon à obtenir une température moyenne, de 30 à 40 degrés, par exemple.

Pour les mêmes raisons, le chauffage des calorifères à air chaud peut être aussi insalubre que celui des poêles. L'air qu'il fournit est sec; l'oxyde de carbone ou d'autres gaz malsains peuvent filtrer au travers des tuyaux métalliques. Enfin, l'égalité de température est loin d'être assurée par ce système de chauffage. D'ailleurs, comme le fonctionnement de ces appareils ne détermine, par lui-même, aucune évacuation d'air vicié, la ventilation des lieux qu'ils sont appelés à chauffer n'est nullement assurée. Pour remédier à ce grave inconvénient, il est donc nécessaire d'établir un foyer auxiliaire, par exemple au bas d'une cheminée que traverse leur tuyau de fumée. Dans le cas où cela n'est pas possible, les calorifères à circulation d'air chaud doivent être employés uniquement pour le chauffage des dépendances des édifices, escaliers, vestibules, corridors, antichambres de passage.

L'emploi des calorifères à air chaud est encore limité d'ailleurs par une autre considération : ils ne peuvent en effet conduire généralement l'air chaud qu'ils fournissent à une

distance horizontale supérieure à 15 mètres de rayon autour du foyer, ce qui oblige à en multiplier le nombre.

§ 2. CALORIFÈRES A CIRCULATION D'EAU CHAUDE ET DE VAPEUR. — CHAUFFAGE PAR LE GAZ.

Sous tous ces rapports, le chauffage par circulation d'eau chaude est préférable. La température de l'air échauffé par ce moyen est à la fois plus modérée et plus régulière. Il est aisé de se rendre compte de ces avantages.

Les *calorifères à circulation d'eau chaude* sont installés, comme les appareils que nous venons de décrire, dans l'étage inférieur de l'édifice. Le foyer chauffe directement l'eau d'une chaudière C (fig. 211). Le liquide, dilaté par cette élévation de température, s'élève par l'effet de la diminution de sa densité dans un tuyau vertical qui le conduit à l'étage le plus haut. Là il communique sa chaleur à l'eau d'un réservoir, ou capacité formant une sorte de poêle D, qui rayonne dans la pièce où il est installé et en échauffe l'air. Un conduit descend de ce réservoir dans un poêle semblable F, situé à l'étage immédiatement inférieur, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'eau, ramenée à son point de départ et refroidie par cet échange incessant, vienne s'échauffer de nouveau dans la chaudière et y reprenne le même mouvement.

Il est aisé de concevoir que cette circulation est continue, qu'elle commence aussitôt, pour ainsi dire, que le foyer est allumé, et qu'elle atteint le maximum de vitesse quand la différence maximum de température et de densité entre l'eau de la chaudière et celle du réservoir supérieur est elle-même atteinte. Les tuyaux de communication servent également au chauffage des pièces. Le réservoir supérieur est muni d'une ouverture par laquelle on remplit d'eau l'appareil, et par où se dégage, soit l'air expulsé, soit la vapeur provenant d'une trop forte élévation de température.

Bonnemain, architecte du dix-huitième siècle, est l'inven-

teur des calorifères à circulation d'eau chaude, qu'on emploie encore aujourd'hui sans modifications essentielles. L'eau n'y atteint d'ordinaire qu'une température inférieure à 100 degrés; pour cette raison on les nomme appareils à ***basse pression.***

Le chauffage par circulation d'eau chaude peut se faire aussi en portant le liquide à de hautes températures, à plus de

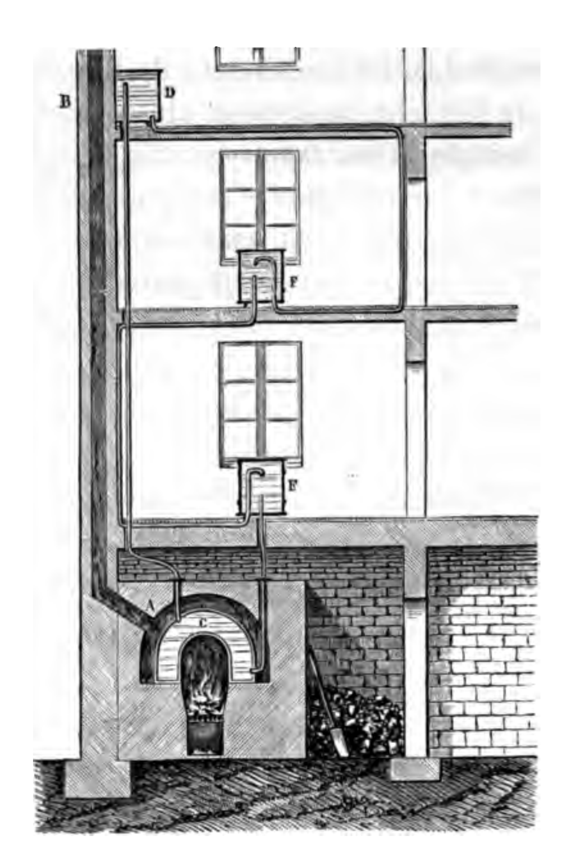


Fig. 211. — Calorifère à circulation d'eau chaude.

300 degrés, par exemple. On emploie alors les calorifères à ***haute pression*** de Perkins, du nom de l'inventeur de ce système. L'eau circule dans des tuyaux qui n'ont alors aucune communication avec l'air libre, et qui montent et descendent d'un étage à l'autre dans les épaisseurs des murs ou sous les planchers, comme dans le système précédent; seulement ces tubes, construits solidement en fer et soigneusement joints, se

contournent en spirales ou serpentins, K, H, E, à chaque étage, depuis le foyer, où ils reçoivent directement l'action de la chaleur, jusqu'aux pièces des étages supérieurs, où ils remplissent une série de capacités en forme de cheminées ou de poêles, D, G, J, ainsi que le représente la figure 212. Au-dessus du serpentin de l'étage le plus élevé se trouve un vase d'expansion *a*

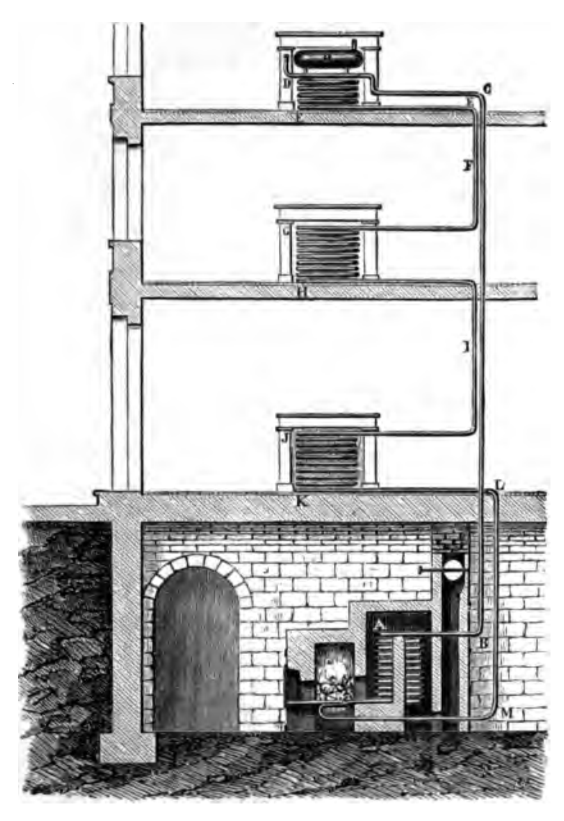


Fig. 212. — Calorifère à circulation d'eau chaude; système Perkins, à haute pression.

contenant une certaine quantité d'air que l'eau comprime quand sa température s'élève, de façon à éviter l'effet de l'expansion du liquide et de la vapeur qui se forme, et dont la pression peut atteindre un nombre considérable d'atmosphères.

Le chauffage par circulation d'eau chaude à haute température est sujet à de graves inconvénients. Il peut causer un incendie en déterminant la combustion des pièces de bois voisines des tuyaux. En cas de fuite, dans les joints ou les fissures

des tuyaux, la vapeur qui se forme et s'échappe peut occasionner des explosions, des brûlures dangereuses.



Fig. 213. — Cheminée à gaz.

Un troisième mode de chauffage par la circulation de la vapeur d'eau est basé sur la grande quantité de chaleur qu'a-



Fig. 214. — Poêle à gaz.

bandonne la vapeur en se condensant. Il n'exige que des tuyaux de faible dimension ; mais divers inconvénients, l'inégalité de

température provenant des négligences du chauffage, les condensations qui en résultent, les chocs, les ruptures, les explosions, ont fait renoncer à ce système, qui n'est plus guère employé, que dans les usines c'est-à-dire là où il est économique d'utiliser la vapeur quand elle s'échappe des machines.

Un système mixte, très avantageux, est celui qu'a imaginé un ingénieur, M. Grouvelle. Il consiste à combiner le chauffage par circulation d'eau chaude avec le chauffage par la vapeur. Celle-ci est employée à échauffer l'eau des poêles installés dans les divers étages ou pièces d'un édifice, comme on vient d'en voir la description dans les calorifères à circulation d'eau

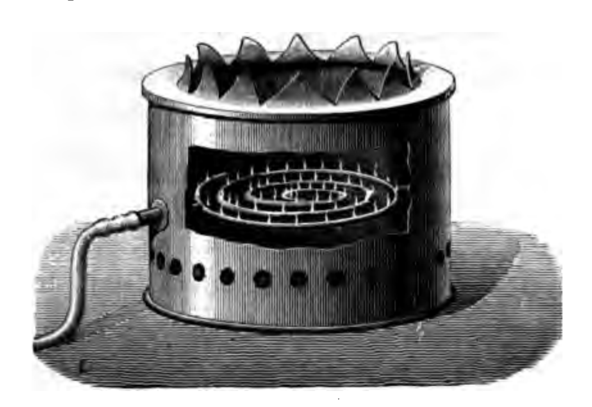


Fig. 215. — Fourneau de laboratoire

chaude à air libre. Les hôpitaux, les prisons, les grands bâtiments d'administration chauffés par ce système, le sont à la fois hygiéniquement et économiquement : il en est de même des théâtres, des salles de concert et de réunion, des écoles. En général, en appliquant les uns ou les autres de ces modes de chauffage, on cherche à résoudre du même coup le problème si important de la ventilation. Les principes sont connus ; mais la pratique n'en est pas moins extrêmement difficile.

Il nous reste à signaler un mode de chauffage qui se recommande à certains égards et pour des usages spéciaux, sinon au point de vue économique, du moins par sa propreté, sa commodité, mais qui n'est possible que dans les villes : nous voulons parler du chauffage par le gaz. Mais il ne faut pas s'y tromper,

il n'y a rien là que la substitution d'un combustible à un autre, et les appareils imaginés pour l'application de ce système n'ont qu'un objet : approprier la combustion d'un nombre quelconque de becs de gaz d'éclairage à l'élévation de température d'un poêle, d'un fourneau de cuisine, d'un appareil industriel, etc.



Fig. 216. — Fourneau de laboratoire. Bec Wiesneg.

Nous donnons quelques exemples des dispositions adoptées[1], sans nous étendre davantage sur un mode de chauffage qui est basé sur les mêmes principes que ceux où l'on emploie comme combustible la houille, le bois, le coke, la tourbe, etc.

§ 3. DISTRIBUTION DE LA CHALEUR AUX HABITANTS D'UNE VILLE, AUX VOITURES D'UN TRAIN.

Les divers systèmes de chauffage décrits dans les paragraphes qui précèdent, basés sur la circulation de l'air chaud,

1. Les figures 213 et 214 montrent comment les cheminées et les poêles sont ordinairement disposés pour le chauffage au gaz. Des bûches en fonte percées de trous laissent passer le combustible, ou bien c'est un tube contourné en couronne, également percé de façon à laisser passage aux becs. En réalité, c'est donc tout simplement un combustible substitué à un autre, plus propre et plus commode, mais plus coûteux. Les fourneaux de laboratoire que représentent les figures 215 et 216, sont maintenant adoptés partout, et, sous des formes variées, servent aux mille opérations que nécessitent les expériences de physique et de chimie. Des appareils analogues sont également en usage dans une multitude d'industries, sans compter leur introduction dans les habitations privées, où on les utilise toutes les fois qu'on a besoin d'avoir promptement un foyer à sa disposition.

de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, n'ont guère été appliqués jusqu'ici qu'à des édifices isolés, plus ou moins considérables, c'est-à-dire à un ensemble de constructions formant un tout solidaire, et aménagé dans ce but spécial par l'architecte du monument.

Les Américains ont songé à une application plus étendue, embrassant toute une cité. De même que des compagnies distribuent le gaz à toutes les maisons d'une ville, et dans chaque maison à tous les appartements qui le réclament, de même ils ont pensé à faire distribuer la chaleur par un procédé analogue, c'est-à-dire en produisant dans une usine centrale la quantité de chaleur nécessaire, et en l'envoyant à domicile par une canalisation souterraine. Les premiers essais de ce mode de chauffage collectif ont eu lieu, dans l'État de New-York, à Buffalo et à Lockport, et de là ont été imités dans plusieurs grandes villes du nord des États-Unis.

Des trois modes de circulation, celui qui est basé sur la cession de la chaleur latente de vaporisation de l'eau était évidemment le seul applicable sur une aussi grande échelle. Des chaudières de l'usine centrale la vapeur passe dans des conduites de fonte, qu'il a fallu protéger contre les pertes dues à la conductibilité du métal. On a entouré, pour cela, ces conduites d'enveloppes épaisses de feutre, substance peu perméable à la chaleur. Ainsi revêtus, les tuyaux sont logés dans des étuis en bois qui achèvent de les préserver du refroidissement.

La vapeur ainsi envoyée dans les rues de la ville parvient, par des tuyaux de distribution spéciaux à chaque maison et à chaque étage ou appartement, à des appareils placés dans les locaux à échauffer. Ces *diffuseurs* sont des tubes en fonte qui s'échauffent au contact de la vapeur et rayonnent la chaleur de la même façon que les poêles ordinaires. Pour augmenter leur surface rayonnante, ces tubes sont pourvus d'ailettes, soit longitudinales dans le sens des arêtes du cylindre, soit transversales et dès lors circulaires. Un robinet d'admission permet

de régler l'introduction de la vapeur, selon les besoins du chauffage; le diffuseur porte en outre, à sa partie inférieure, un *purgeur* qui permet l'écoulement de l'eau de condensation. Cette eau est d'ailleurs assez chaude pour qu'on puisse, en la recueillant, l'utiliser pour des usages domestiques ou industriels.

L'expérience de ce mode de distribution de la chaleur est trop récente encore pour qu'il soit possible d'en apprécier les avantages ou d'en reconnaître les inconvénients.

Le chauffage des voitures dans les trains de chemin de fer a été l'objet d'un grand nombre d'essais, et tous les procédés connus de chauffage ont été successivement expérimentés : poêles, cylindres remplis de sable chauffé au rouge sombre, eau chaude, air chaud, vapeur. Les ingénieurs de la Compagnie de l'Est, en France, sont arrivés après discussion et comparaison de tous les systèmes à cette conclusion, que l'eau chaude est encore la substance qui convient le mieux à toutes les conditions d'un chauffage constant et hygiénique. On emplit dans ce but des bouillottes mobiles, placées, comme tout voyageur a pu le voir, entre les banquettes. C'est le système généralement adopté sur les lignes françaises. Une fois refroidies, les chaufferettes sont enlevées, puis réchauffées, soit par injection directe de vapeur, soit par immersion dans une fosse remplie d'eau dont la température est maintenue, par une injection de vapeur, à un point voisin de l'ébullition. Avec ce dernier procédé, cinq minutes suffisent pour porter la température à 90°. C'est ainsi que procède la compagnie de l'Est. Sur les lignes d'Orléans, de Lyon, de l'Ouest et du Nord, le réchauffage des bouillottes se fait par injection directe de vapeur. La première de ces compagnies a aussi adopté un appareil, qu'elle nomme *thermo-siphon*, et qui sert à chauffer tous les compartiments d'une même voiture. Voici en quoi il consiste.

Une chaudière en fonte, à foyer intérieur, est placée vers le milieu de la voiture, sous la saillie formée par la caisse sur le brancard du châssis. Deux tuyaux partant de sa partie supé-

rieure vont distribuer l'eau chaude aux deux extrémités de la voiture. Cette eau circule, de là, dans des chaufferettes en fonte placées transversalement entre les banquettes de chaque compartiment, puis revient par une canalisation spéciale à la partie inférieure de la chaudière. Pour réparer les pertes dues à l'évaporation, un récipient plein d'eau et communiquant avec l'atmosphère sert de réserve et permet en outre la libre dilatation de l'eau. La fumée du foyer s'élève, par un tuyau logé dans l'axe d'une des cloisons, au-dessus du toit de la voiture. On obtient ainsi aisément, sous les pieds des voyageurs, une température de 50° à 60°, et dans le wagon un excès de 8 à 10 degrés sur la température extérieure. Ce mode de chauffage, qui n'exige pas qu'on ouvre les portières pour remplacer les chaufferettes refroidies, ne consomme pas plus de 5 centimes de combustible par voiture et par heure.

En Belgique, on emploie le chauffage des wagons par une circulation d'eau chaude, refoulée du tender sous les pieds des voyageurs; l'eau retourne des voitures au tender ou se rend directement, partie à l'injecteur de chauffage, partie à l'injecteur d'alimentation de la chaudière. Ce procédé n'a d'inconvénient que celui d'un double accouplement pour réunir la canalisation des voitures. En Allemagne, en Autriche, on emploie la circulation de la vapeur dans des tuyaux qui passent sous les pieds des voyageurs. Enfin en Suède, c'est la vapeur et l'air chaud combinés. La vapeur circule dans un tuyau en fer, muni d'ailettes qui augmentent la surface de rayonnement. Il est placé dans une boîte en bois suspendue sous le châssis. L'air de la caisse chauffé par le tuyau à vapeur pénètre dans les compartiments par des bouches de chaleur placées sous les sièges.

Un ingénieur français, M. Ancelin, a proposé d'utiliser, pour le chauffage des wagons, la chaleur latente de fusion d'un composé, l'acétate de soude, qui peut emmagasiner beaucoup plus de chaleur que l'eau dans les mêmes limites de température. « Une chaufferette de 11 litres contient, dit-il, environ 15 kilo-

grammes d'acétate; en supposant sa température initiale de 80°, température maxima des chaufferettes à eau lors de leur mise dans les wagons, elle dégagera :

Chaleur sensible de 80° à 60°.	225	calories.
Chaleur latente.	1410	—
Chaleur sensible de 60° à 40°.	96	—
Total.	1731	calories.

« La même chaufferette remplie d'eau dégagera, de 80° à 40°, 440 calories : l'acétate donnera donc environ quatre fois autant de chaleur que l'eau[1]. »

Outre l'économie notable de combustible, ce mode de chauffage aurait l'avantage d'éviter le renouvellement du remplissage des chaufferettes, qui se ferait une fois pour toutes, grâce à la stabilité du composé employé. Des essais faits sur diverses lignes de France et de l'étranger ont donné, paraît-il, de bons résultats.

§ 4. LES COMBUSTIBLES ; LEURS POUVOIRS CALORIFIQUES.

Ceci nous amène tout naturellement à dire un mot des combustibles eux-mêmes, de leur valeur relative, de la chaleur qu'ils développent : question qui n'est pas indifférente, quand il s'agit de chauffage.

Le bois a été le premier combustible employé, et aujourd'hui encore des contrées entières n'en emploient pas d'autre. C'est certes le plus agréable, mais c'est aussi l'un des plus coûteux, sauf dans les pays couverts de forêts et éloignés des mines de houille. La houille, l'anthracite, le lignite et autres combustibles minéraux, le coke, qui est le résidu laissé par la distillation de la houille, sont d'un emploi de plus en plus fréquent, parce qu'ils constituent un mode de chauffage plus économique. En certaines contrées, on brûle de la tourbe; en réalité,

1. L'acétate de soude éprouve la fusion aqueuse vers 59°; il absorbe pour ce changement d'état environ 94 calories.

c'est toujours le règne végétal, celui d'aujourd'hui ou celui des anciennes périodes géologiques, qui fournit l'élément de la chaleur développée dans les divers appareils de chauffage que nous avons passés en revue. A vrai dire, le gaz d'éclairage, employé comme combustible, est dans le même cas : c'est un des composés de la houille, et ce simple fait suffit à faire voir pourquoi le chauffage par le gaz est plus coûteux que celui par la houille même d'où le gaz est extrait.

Comparons maintenant, d'après les expériences des physiciens, les pouvoirs calorifiques de ces diverses substances. On entend par là le nombre d'unités de chaleur que développe la combustion intégrale de 1 kilogramme de chacune :

Combustibles.	Calories.	Rapports des pouvoirs calorifiques.
Houille	8000	1,00
Anthracite	7500	0,95
Coke	7000	0,90
Lignite	6500	0,80
Charbon de bois	6000	0,75
Tourbe	5000	0,60
Bois sec	4000	0,50
Bois (20 pour 100 d'eau)	3000	0,38
Gaz d'éclairage	10000	1,25

C'est le gaz d'éclairage qui a le pouvoir le plus élevé[1]; viennent ensuite la houille et les combustibles minéraux, puis la tourbe et le bois; le bois humide est inférieur à tous les autres.

On a vu, du reste, de combien il s'en faut que les appareils de chauffage, même les plus perfectionnés, utilisent toute la chaleur de la combustion. La plus grande partie de cette chaleur s'en va au dehors, par la cheminée.

Veut-on se rendre compte des pertes considérables qui s'en vont annuellement en fumée? Prenons la consommation de

1. Il importe d'observer qu'il faut distiller en moyenne 100 kilogrammes de houille pour produire 28 mètres cubes de gaz. Si l'on prend 0,4 pour la densité de ce gaz, cela fait à peu près 14[k],5 pour le poids de 28 mètres cubes. Or 100 kilogrammes de houille brûlés directement donnent 800 000 calories, les 28 mètres cubes de gaz qu'on en extrait n'en donnent que 145 000. On voit donc la raison qui rend le chauffage au gaz plus coûteux, malgré sa chaleur de combustion élevée.

Paris pour exemple. L'*Annuaire du Bureau des Longitudes pour* 1872 nous donne le chiffre de cette consommation pour l'année 1869 :

Bois de diverses sortes.	994 057 stères.
Charbon de bois.	4 902 315 hectolitres.
Houille, coke, tourbe.	682 011 827 kilogrammes[1].

En prenant un chiffre même inférieur à la valeur moyenne de ces divers combustibles, on ne peut guère évaluer à moins de 69 millions de francs la dépense totale, 25 millions pour le bois, 24 millions pour la houille, 20 millions pour le charbon de bois. Mais ce dernier combustible ne sert guère pour le chauffage, et une notable partie de la houille est employée pour des usages industriels. La perte de chaleur n'est pas moins réelle pour les trois genres de combustibles, et l'on peut affirmer que 60 pour 100 au moins s'en vont en fumée, sans être utilisés. C'est donc une perte annuelle de plus de 40 millions de francs, perte qui pourrait certes être réduite de beaucoup si l'on adoptait partout des appareils rationnellement construits. La bourse des consommateurs et leur santé s'en trouveraient également bien.

Que serait-ce, si l'on appliquait les mêmes calculs à la France entière et à chaque pays dans le monde entier?

1. Douze ans plus tard, c'est-à-dire en 1881, la consommation est devenue :

Bois.	793 000 stères.
Charbon de bois	5 092 000 hectolitres.
Houille, etc.	952 000 000 kilogrammes.

On voit que la consommation de la houille s'est développée considérablement aux dépens de celle du bois. Dans ces chiffres, on ne peut distinguer la part, probablement assez faible, qui revient au chauffage par le gaz.

CHAPITRE III

APPLICATIONS DIVERSES DES LOIS DE LA CHALEUR

§ 1. HABITATIONS.

La température d'un appartement ne dépend pas seulement des appareils de chauffage qui s'y trouvent installés, et de la chaleur que ces appareils communiquent à l'air par voie de rayonnement, de convection ou tout autre mode de propagation calorifique. Elle dépend encore, en premier lieu, de la température extérieure; en second lieu, des murs ou abris qui s'opposent, avec plus ou moins d'efficacité, au passage de la chaleur intérieure au dehors. Cette déperdition inévitable est plus ou moins rapide, selon que les murs sont plus ou moins épais, que les matériaux dont ils sont formés sont de bons ou de mauvais conducteurs de la chaleur; enfin, que les ouvertures dont ils sont percés, et qui sont fermées par des cloisons vitrées pour donner accès à la lumière du jour, sont plus ou moins nombreuses et présentent une surface plus ou moins considérable.

Les murs épais, formés de matériaux mauvais conducteurs, procurent à ceux qui les habitent le double avantage de les protéger en hiver contre le froid, en été contre la chaleur du dehors. La pierre, le marbre, sont, sous ce rapport, moins avantageux que la brique et surtout que le bois. Dans les pays froids, en Russie par exemple, nombre d'habitations rurales ont des murs formés de poutres ou de planches épaisses consti-

tuant une double cloison qu'on remplit de matières divisées, de paille hachée, de sciure de bois, de mousse sèche. L'air emprisonné dans les interstices forme avec les matières et les cloisons un ensemble très peu perméable à la chaleur, très mauvais conducteur, et, par suite, c'est un excellent abri contre la température basse du dehors.

Mais c'est par les portes, les fenêtres vitrées que, pendant le jour, la chaleur se perd avec le plus de rapidité. Un moyen excellent de se prémunir contre cette déperdition consiste dans l'emploi des doubles fenêtres : l'air, qui se trouve emprisonné entre les deux minces cloisons vitrées, ne se renouvelant pas, et étant un corps mauvais conducteur, constitue une enveloppe protectrice que la chaleur obscure de l'intérieur ne franchit que difficilement, tandis que la chaleur lumineuse des rayons solaires pénètre, au contraire, avec facilité dans l'appartement. Ainsi se trouve utilisée la propriété des milieux qui sont, à la fois, diathermanes pour les rayons lumineux et athermanes pour le rayonnement de la chaleur obscure.



Fig. 217. — Une glacière.

Ce double vitrage est très avantageusement employé dans les serres, dont les plantes ont besoin de la lumière du jour, et qui souffrent de l'obscurité et de l'humidité, quand, pour les préserver du froid, on recouvre le vitrage de paillassons ou d'autres abris opaques.

Les caves sont moins exposées que les appartements des étages supérieurs à l'échange de chaleur qui se fait de dedans en dehors ou de dehors en dedans. Aussi conservent-elles toute l'année une température moyenne qui varie d'autant moins

qu'elles sont plus profondes. Elles paraissent donc chaudes en hiver et fraîches en été. Si elles ne peuvent être considérées comme des endroits salubres pour l'habitation, elles servent du moins à la conservation de nombre d'objets qui souffriraient soit d'un froid excessif, soit d'une chaleur trop élevée.

Les glacières sont des sortes de caves plus profondes que les caves ordinaires, creusées dans le sol et intérieurement revêtues de murailles en briques, où l'on entasse des morceaux de glace pendant l'hiver pour les conserver et s'en servir aux époques de grande chaleur. Après avoir rempli la cavité de fragments de glaçons, on y verse, pendant les fortes gelées, une certaine quantité d'eau qui recouvre le tout d'une couche de glace isolante empêchant l'accès de l'air extérieur; puis on entasse de la paille qui forme une couche mauvaise conductrice. Un toit recouvert de chaume et de gazon, des plantations d'arbres qui, par leur ombre, préservent la glacière des rayons solaires, achèvent de rendre l'intérieur de la cavité tout à fait imperméable à la chaleur du dehors.

Toutes ces précautions sont la plupart basées, comme on voit, sur la faible conductibilité, pour la chaleur, du sol, des briques et des matières divisées.

§ 2. VÊTEMENTS.

Des habitations, passons aux vêtements.

Il n'est guère de contrée où les vêtements ne soient indispensables pour se garantir des intempéries, et surtout des excès de la température, soit en hiver, soit en été. L'homme n'est pas naturellement protégé contre cette action dont sa santé peut tant souffrir. Il n'est pas, comme la plupart des animaux, couvert d'une enveloppe de poils, de plumes, de duvet, d'une toison plus ou moins épaisse protectrice des injures de l'air; et c'est à son industrie qu'il a dû recourir, par laquelle d'ailleurs il n'a guère fait qu'imiter la nature d'une

façon plus ou moins intelligente, selon le degré de civilisation où il est parvenu.

A l'état de sauvagerie qui caractérisait les premiers âges de l'humanité, état dont il existe encore tant de restes, l'homme n'a pu mieux faire que de se couvrir des peaux des animaux tués à la chasse. Ce vêtement primitif est encore celui de



Fig. 218. — Vêtements esquimaux.

maintes peuplades barbares. Dans les climats polaires, les Esquimaux, les Lapons, les Samoyèdes, se vêtissent de peaux d'ours, de rennes, qu'ils façonnent grossièrement. Le cuir est imperméable à l'humidité, mais ce sont les poils dont il est recouvert qui forment la couche véritablement protectrice contre le froid, à cause de leur faible conductibilité pour la chaleur.

La température du corps humain est à peu de chose près

constante dans tous les climats et à toute saison. L'action extérieure ne la modifie pas, pour ainsi dire. « Le sang d'un Lapon, dit Tyndall, est sensiblement aussi chaud que celui d'un Indou; et le navigateur anglais, en faisant voile du nord au sud ou du sud au nord, trouve que la température de son sang est à peine augmentée à mesure qu'il approche de l'équateur, à peine diminuée à mesure qu'il s'approche du pôle. » Ce qu'il s'agit d'empêcher à l'aide des vêtements, c'est la sensation désagréable que produit sur nous le contact de notre peau avec l'air froid ou avec l'air échauffé fortement par les rayons solaires, ce sont les accidents qui résultent pour notre santé de ce brusque échange.

Il y a trois choses qui rendent un tissu impropre à conduire la chaleur : la nature de la substance dont il est composé, la structure même du tissu, et enfin son épaisseur. Au premier point de vue, voici dans quel ordre se rangent les diverses substances, en allant de la plus conductrice à celle qui l'est le moins. Ces résultats sont dus aux expériences de Rumford : soie tordue, coton ou laine, laine de brebis, taffetas, soie écrue, poil de castor, édredon, poil de lièvre.

On voit par là que la soie est meilleure conductrice que la laine; et comme les tissus de soie sont d'une structure plus serrée que ceux de laine, ces derniers ont donc la double supériorité tant du côté du tissu que du côté de la matière.

L'expérience journalière confirme ces résultats tirés de l'induction. Les vêtements de laine sont ceux qui préservent le mieux contre le froid, parce qu'ils s'opposent au passage de la chaleur du corps. Ce sont aussi en été, pourvu que l'étoffe soit légère, ceux qu'il faut préférer pour arrêter les rayons de chaleur et les empêcher de pénétrer jusqu'à notre corps. Du reste, on sait que la couleur a aussi une influence ; que généralement les vêtements noirs ou de couleurs sombres émettent la chaleur avec plus de facilité que ceux de couleurs claires ou que les vêtements blancs, de sorte qu'en hiver les derniers sont préférables aux autres, puisqu'ils sont moins favorables à

la déperdition de chaleur du corps. En été, c'est la chaleur extérieure que les vêtements blancs absorbent avec moins de facilité que les vêtements sombres ; à conductibilité égale, ils sont donc encore préférables aux autres.

Ce n'est pas d'ailleurs le poids de l'étoffe qui rend un vêtement chaud, c'est la structure divisée du tissu ; un édredon, rempli d'un duvet fin et léger, est plus chaud que de lourdes et épaisses couvertures.

On voit, par ces exemples, combien il importe de tenir compte des diverses propriétés calorimétriques des corps, de leur conductibilité, de leur pouvoir rayonnant, absorbant, émissif, dans les applications usuelles relatives au chauffage, à la construction des habitations, aux vêtements. Toutefois ce n'est pas tout : il faut tenir compte aussi des indications de l'hygiène, lesquelles ne sont plus du ressort de la physique, mais de la physiologie. Nous recherchons la chaleur en hiver, le frais en été ; encore faut-il savoir dans quelle mesure nous devons le faire, pour que la santé, qui est l'équilibre des fonctions de notre corps, se maintienne constamment en bon état.

§ 3. LAMPES DE SURETÉ DES MINEURS.

On a vu, dans la *Première Partie* de ce volume, comment une toile métallique, placée au-dessus d'une flamme de gaz, empêche la combustion de se propager au-dessus de la toile. Celle-ci absorbe assez de chaleur pour que la température du gaz, qui a passé par les petites ouvertures du tissu, soit au-dessous de la température de l'ignition.

Un illustre physicien, un ingénieur anglais, Davy, a utilisé cette propriété importante pour prévenir, dans les mines, les accidents provenant de l'inflammation du grisou. La lampe de mineur qui porte son nom a reçu, depuis l'époque où elle a été inventée, des modifications ou des perfectionnements divers ; le principe de la construction reste le même. Les figures 219,

220 et 221 en montrent plusieurs modèles. Dans tous, la détonation qui résulte de l'introduction du mélange explosif



Fig. 219. — Première lampe de sûreté de Davy. Lampe à treillis.

dans la capacité où brûle la flamme de la lampe est réduite à l'intérieur même : l'inflammation est limitée à ce très petit



Fig. 220. — Lampes de sûreté des mineurs. Lampes à treillis et à tubes de cristal.

espace. L'enveloppe ou chemise métallique empêche la chaleur de se propager au dehors, et le mineur est averti du danger

sans avoir à en redouter les terribles effets. A la vérité, il doit se servir de la lampe avec précaution, et veiller à ce qu'elle soit toujours en bon état; la moindre déchirure des fils de la toile métallique, pour peu qu'elle produise une ouverture dans l'enveloppe protectrice, peut suffire à la communication de la flamme avec l'extérieur. De même, un mouvement trop brusque de la lampe, en déterminant la pénétration mécanique de la flamme avec les mailles, peut produire l'explosion redoutée. Les catastrophes dont les mines sont encore de temps en temps le théâtre, prouvent assez que ces précautions ne sont pas toujours rigoureusement observées.



Fig. 221. — Coupe d'une lampe Combes.

Les nouveaux modèles de la lampe Davy donnent plus de lumière que les modèles primitifs, la flamme se trouvant entourée de cylindres de verre plus ou moins élevés. De plus, une disposition particulière prévient l'imprudence des mineurs, qui ne peuvent ouvrir leur lampe sans l'éteindre. La lampe Combes, que représente la figure 221, est formée d'un épais cylindre de verre qui enveloppe la flamme, et, au-dessus de celle-ci, d'un tube métallique qui est enveloppé lui-même d'une toile ou treillis métallique. L'air nécessaire à la combustion pénètre latéralement par des ouvertures situées au-dessous de la flamme, à laquelle cet air n'arrive qu'après avoir traversé deux épaisseurs de toiles métalliques.

§ 4. DIVERSES APPLICATIONS DOMESTIQUES DE LA CHALEUR.

Rappelons quelques usages basés sur le faible pouvoir conducteur de certaines substances.

Pourquoi les manches des outils et ustensiles en métal qui vont au feu, sont-ils en bois? Pourquoi garnit-on d'osier les anses des bouilloires, de cuir ou d'étoffe celles des fers à repasser? Parce que le bois, le cuir et la laine ont un très faible pouvoir conducteur. C'est la même raison qui fait paraître ces substances plus chaudes que les métaux, que le marbre, dans une même enceinte où tous les objets ont cependant une même et égale température. Le plancher d'une chambre est moins froid que le carrelage, parce que le bois conduit plus mal la chaleur que la brique ; un plancher de sapin est moins froid qu'un plancher de chêne pour une raison semblable. Dans tous ces exemples, le contact de la main avec des corps bons ou mauvais conducteurs cause une sensation de froid ou de chaleur, parce que l'échange de chaleur qui se fait dans un sens ou dans l'autre, entre ces corps et notre peau, est plus ou moins rapide. L'impression désagréable qui provient d'une brûlure est due à un échange trop brusque de chaleur qui détermine la désorganisation du tissu. La même impression peut résulter du contact avec un objet dont la température est très basse : telle est celle qu'on ressent en touchant un morceau de mercure ou d'acide carbonique congelé. Dans les climats polaires, la main ne peut toucher impunément les objets métalliques, qu'il faut envelopper d'étoffe, si d'ailleurs on ne veut se servir de gants épais.

La faible conductibilité de certaines substances, telles que la laine, le feutre, a conduit à une application domestique curieuse, dont nous allons dire un mot.

La *marmite automatique* (fig. 222) qu'on voyait à l'Exposition universelle de 1867, et qui est utilisée dans les pays du nord de l'Europe, n'est autre chose qu'une marmite métallique où l'on introduit la viande, l'eau et tous les légumes et ingrédients constituant le pot-au-feu. On soumet le tout à la chaleur d'un foyer jusqu'à ébullition. Aussitôt que la température d'ébullition est obtenue, on enferme la marmite dans une boîte dont l'intérieur et le couvercle sont doublés d'une épaisse gar-

niture de feutre; on recouvre en outre la marmite d'un coussin de même matière, on ferme hermétiquement et l'on peut alors abandonner l'ustensile à lui-même : la cuisson se continue et



Fig. 222. — Marmite automatique.

s'achève sans feu, parce que, grâce à la très faible conductibilité de l'enveloppe, la chaleur interne conserve une haute température pendant plusieurs heures; au bout de trois heures, elle s'abaisse en moyenne seulement de 12 degrés.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS DIVERSES DES LOIS DE LA CHALEUR DILATATION

§ 1. PENDULES COMPENSATEURS.

Nous avons vu, dans le chapitre des *Applications de la pesanteur*, qui traite du pendule[1], qu'une des conditions essentielles de l'emploi du pendule dans les horloges est l'invariabilité de longueur de la tige, ou, si l'on veut, de la distance du point de suspension au centre d'oscillation.

Or cette invariabilité suppose que la température à laquelle le pendule a été une fois réglé reste elle-même constante. Car, si elle augmente, la matière dont est formée sa tige se dilate; le pendule s'allonge et ses oscillations croissent en durée. Si, au contraire, cette température s'abaisse, la matière se contracte, le pendule se raccourcit et les oscillations deviennent plus rapides. Il résulte de là qu'une horloge bien réglée pour une température moyenne doit *retarder* en été et *avancer* en hiver.

Comment remédier à ce défaut? Comment l'atténuer, du moins, de façon à assurer l'invariabilité de longueur du pendule et l'isochronisme de ses oscillations? On y est parvenu en utilisant l'inégalité de dilatation des divers métaux, et en compensant l'accroissement de longueur du pendule, qui fait baisser le centre d'oscillation, par l'élévation de ce même centre. De là le

1. Le MONDE PHYSIQUE, t. I, 2e partie, pages 370 et suiv.

nom de *pendules compensateurs* donné aux diverses combinaisons imaginées dans ce but.

Un des plus usités est le *pendule à cadre* ou *à gril*, inventé par Harrison. La tige est formée par une série de verges alternativement de laiton et d'acier, réunies par des traverses, de telle façon que les allongements produits par la dilatation dans toutes les verges d'acier tendent à abaisser le centre du pendule, tandis que ceux qui affectent les verges de laiton, se faisant de bas en haut, tendent au contraire à le relever. La tige du milieu, qui est ici d'acier (fig. 223 et 224), est celle qui soutient la lentille du pendule; elle passe par des ouvertures pratiquées dans les traverses, de manière à en rester indépendante. La tige de suspension est au contraire fixée à la traverse supérieure du cadre qui enveloppe les autres. Les longueurs de ces couples de verges doivent être calculées d'après les coefficients de dilatation de l'acier et du laiton, de sorte que la somme des dilatations des couples d'acier soit précisément égale à la somme des dilatations des couples de laiton.

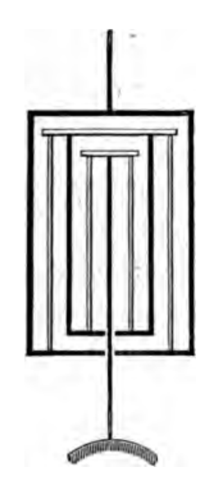


Fig. 223. — Disposition des tiges dans le pendule compensateur à gril.

Si la longueur totale du pendule est représentée par L, la somme des longueurs des couples de tiges d'acier par F et celle des tiges de laiton par C, on a $L = F - C$. K et K' étant d'ailleurs les coefficients de dilatation des deux métaux, on devra, pour que la compensation ait lieu, avoir l'égalité $KF = K'C$, ou $K(L + C) = K'C$. D'où l'on tire $\frac{C}{L} = \frac{K}{K' - K}$. Prenons pour K le nombre 0,00001075 et pour K' 0,00001878, il viendra $\frac{C}{L} = \frac{1075}{803} = 1,34$ environ. En employant quatre verges de laiton comme dans la figure, le rapport précédent donne pour chaque verge 0,67, soit les deux tiers de la longueur du pendule. Mais

si l'on n'employait que deux tiges de laiton (ou trois d'acier), la longueur des premières devrait dépasser d'un tiers la longueur du pendule, ce qui obligerait à une disposition sinon impossible, du moins fort incommode.

On n'obtient ainsi toutefois qu'une compensation approchée, parce que le centre d'oscillation d'un pendule composé ne se

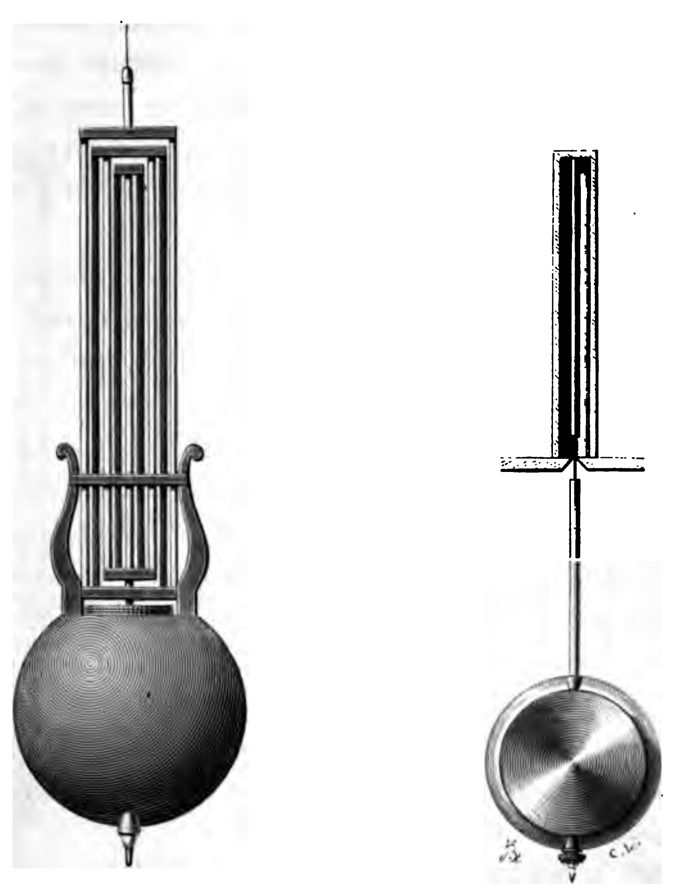


Fig. 224. — Pendule compensateur à gril. Fig. 225. — Compensateur Leroy.

confond ni avec le centre de gravité de la lentille, ni avec celui de tout l'appareil. Il y a donc encore à régler cette compensation, ce qui se fait par tâtonnement à l'aide d'une vis placée au-dessous de la lentille.

Le *pendule compensateur de Leroy* (fig. 225) consiste en un tube de laiton supporté par une traverse fixe au-dessus d'une ouverture en biseau, qui laisse passer une tige d'acier sus-

pendue au fond du tube. Cette tige est composée de deux parties réunies par une lame d'acier flexible à la hauteur de la fente. La distance de cette fente au centre d'oscillation donne la longueur du pendule, puisque c'est là qu'est le véritable point de suspension.

En se dilatant, le tube de laiton remonte et le centre d'oscillation du pendule suit ce mouvement. Au contraire, la tige tend à l'abaisser, et l'on conçoit qu'on ait calculé les dimensions respectives des parties de l'appareil, de façon qu'il y ait compensation. On rend d'ailleurs cette compensation plus complète par le moyen adopté pour le pendule à gril et pour tous les autres systèmes compensateurs.

Nous citerons encore trois autres systèmes : le *compensateur Brocot*, que représente la figure 226, le *compensateur Martin* (fig. 227) et le *compensateur Graham* (fig. 228), qui est le premier système adopté pour la compensation des pendules.

Dans le premier de ces compensateurs, la tige de fer *f* qui supporte la lentille est munie, à la partie supérieure, d'une traverse à laquelle sont liées deux verges de laiton *c*, *c*, qui se dilatent librement par leurs bouts inférieurs appuyés eux-mêmes sur deux leviers *a*, *a*, fixés à la lentille. Ces leviers agissent sur celle-ci à l'aide des pivots *t*, *t*, et la relèvent, de sorte que le centre d'oscillation tend à monter en même temps que la dilatation de la tige de suspension tend à l'abaisser. La compensation se trouve ainsi en partie effectuée; il ne reste plus qu'à la compléter par tâtonnement.

Le pendule Martin est représenté dans la figure 227. C'est un pendule ordinaire, dont la tige porte, fixé en un point de sa longueur, un système de deux lames métalliques inégalement dilatables, soudées ensemble et terminées par deux boules pesantes, en or par exemple. Le métal le plus dilatable étant en dessous, quand la température montera au-dessus du point pour lequel les lames sont rectilignes, le système se courbera en arc, présentant sa concavité vers le haut, le centre de gravité et par suite le centre d'oscillation du pendule remonte-

ront avec les masses; si la température baisse, l'arc sera en sens contraire et le centre baissera. On conçoit qu'on ait calculé les dimensions et les poids des pièces du système de façon qu'il y ait compensation. Les boules d'or peuvent d'ailleurs glisser elles-mêmes dans les vis qui les retiennent et on peut, en les déplaçant, achever la compensation par tâtonnement.

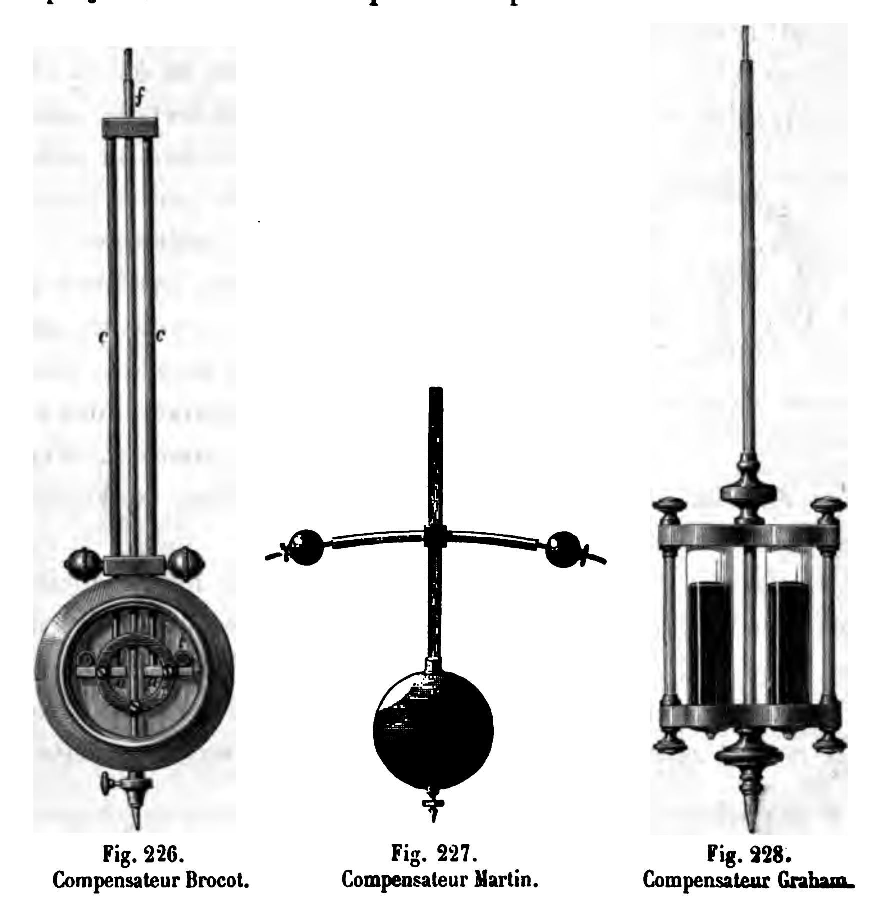


Fig. 226. Compensateur Brocot. Fig. 227. Compensateur Martin. Fig. 228. Compensateur Graham.

Le compensateur Graham est formé d'une tige de fer qui supporte à sa partie inférieure une plaque sur laquelle reposent deux cylindres de cristal en partie remplis de mercure. Tandis que la dilatation donne lieu à un allongement de la tige de suspension, et abaisse en conséquence le centre d'oscillation du pendule, celui-ci se trouve relevé par l'exhaussement du niveau du mercure dans les tubes provenant de la même élévation de température.

On emploie à volonté un ou deux tubes; mais, dans tous les cas, on calcule de la même manière la hauteur qu'il faut donner au mercure pour compenser la dilatation de la tige de fer, en tenant compte à la fois de la dilatation du mercure et de celle du verre. Graham, au lieu d'une tige de fer, suspendait son pendule à l'aide d'une tige de verre, mais le principe et le calcul[1] restaient semblables.

Pour rendre la compensation plus rigoureuse, on ôte ou l'on remet, selon les indications de l'expérience, une certaine quantité de mercure, ou bien encore on relève ou l'on abaisse le pendule par le moyen d'une vis fixée à sa partie inférieure.

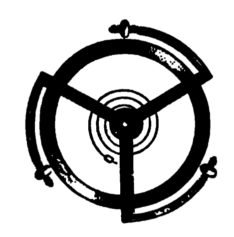


Fig. 229. — Compensateur des chronomètres.

Il existe encore d'autres systèmes de compensation des pendules, mais ils sont basés toujours sur le même principe, c'est-à-dire sur l'inégalité de dilatation des solides ou liquides qui les composent, et sur une disposition qui relève d'un côté, et abaisse de l'autre, le centre d'oscillation.

L'effet des variations de la température sur les balanciers des chronomètres est analogue à celui qu'elles produisent sur les pendules. Ces régulateurs consistent en une roue évidée (fig. 229) qui est mise en mouvement par l'action d'un ressort dit *ressort spiral*. Il en résulte des oscillations qui doivent

1. Ce calcul est très simple. Soit L la longueur de la tige de verre, entre le point de suspension et le fond du tube renfermant le mercure; soit K le coefficient de dilatation linéaire du verre. Pour un accroissement ou pour une diminution d'un degré de température, l'allongement ou le raccourcissement de la tige fera baisser ou hausser de LK le centre de gravité du mercure. Mais la dilatation ou la contraction du mercure, au contraire, fera monter ou baisser ce centre de $\frac{HK'}{2}$, si H est la hauteur de la colonne liquide, et K' le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre. Pour la compensation, on doit avoir $LK = \frac{H}{2} K'$, d'où l'on tire $\frac{H}{L} = \frac{2K}{K'}$.

En prenant $K = 0{,}0000086$ et $K' = 0{,}000154$, on obtient à peu de chose près pour le rapport cherché $\frac{1}{9}$. La longueur de la tige de verre doit donc être environ 9 fois la hauteur du mercure dans les tubes.

Avec une tige de fer doux forgé, on trouverait un peu moins de $\frac{1}{6}$.

rester parfaitement isochrones; mais, comme la durée de ces oscillations dépend du rayon du balancier, de sa masse et de la force du ressort, il arrive que la dilatation provoquée par l'augmentation de température accroît ce rayon, et, par suite, la durée de l'oscillation : le chronomètre retarde donc. Il avance quand, au contraire, la température est au-dessous du point pour lequel il a été réglé. A l'aide de lames fixées sur le contour de la roue, et portant de petites masses métalliques, la compensation peut s'effectuer, car les lames, en se dilatant, prennent une plus forte courbure; les masses se rapprochent du centre, ce qui contre-balance l'effet de l'accroissement de rayon.

§ 2. MESURE DES LONGUEURS ; CORRECTIONS NÉCESSITÉES PAR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE.

Lorsqu'on a besoin de mesurer, avec une grande précision, la distance entre deux points ou la longueur de la ligne qui les joint, il est indispensable de tenir compte des effets de la température sur les instruments qu'on emploie, et notamment sur les règles, ordinairement métalliques, servant à cet usage. Quelque faible que semble, au premier abord, l'effet de la dilatation sur une tige métallique de quelques mètres de longueur, il est loin d'être négligeable lorsqu'il se répète un grand nombre de fois. Tel est le cas des opérations très délicates de la géodésie, lorsqu'il s'agit de mesurer une base devant servir de point de départ au canevas d'une triangulation. Dans le cours d'une opération de ce genre, la température de l'air extérieur peut varier, dans une même journée ou dans plusieurs journées successives, d'un nombre notable de degrés. La règle employée subit donc les dilatations ou contractions successives qui résultent de ces variations; sa température peut en outre être modifiée par le contact des mains des opérateurs et par le voisinage de leur propre corps. En ne tenant

point compte des températures, on inscrirait donc comme égales des longueurs tantôt plus grandes, tantôt plus petites que la longueur vraie de la règle prise pour unité; et l'incertitude résultant de ces inégalités ôterait toute valeur au nombre définitif, obtenu pour la mesure de la base demandée.

C'est ce qu'ont bien compris les savants qui ont entrepris, dans divers pays et à diverses époques, la mesure des arcs de méridien ou de parallèle qui devaient servir à déterminer la figure et les dimensions du globe terrestre. Borda, Delambre et Méchain, Biot et Arago, en France, Roy en Angleterre, Plana et Carlini en Italie, et beaucoup d'autres géodésistes n'ont pas manqué de prendre les précautions de diverses natures exigées pour de telles déterminations, et de faire subir à leurs résultats les corrections formulées tout d'abord par Borda en ce qui concerne l'influence de la température.

Le métal employé pour les règles était le platine, choisi à cause de sa faible dilatabilité. Chaque règle en platine, de deux toises de longueur, était recouverte d'une seconde règle en cuivre, un peu plus courte que la première, et fixée sur elle par l'une de ses extrémités seulement. L'autre extrémité pouvait donc glisser librement sur la double toise de platine, sous l'action d'un accroissement de température qui dilatait le cuivre dans une plus grande proportion que l'autre métal. Le but de cette disposition était de former ainsi, avec la double règle, un appareil thermométrique capable de marquer sa propre température. Voici comment :

Borda, pour graduer ce thermomètre, ou, comme on lui en a donné le nom, ce *pyromètre*, plongea successivement la règle dans la glace fondante et dans un bain d'eau bouillante. Il marqua de deux traits les points où l'extrémité libre de la règle de cuivre parvint sur le platine, et divisa en 100 parties égales l'intervalle qui les séparait, chacune des divisions correspondant à 1 degré centigrade.

En supposant cette division réellement effectuée, il suffisait évidemment, dans la suite des opérations, de lire à la loupe la

division à laquelle se trouvait l'index ainsi formé, pour obtenir en degrés centigrades la température des deux règles au moment de la lecture. Connaissant le coefficient de dilatation linéaire du platine, il était aisé alors de calculer la correction à faire subir à la longueur de la règle, ou, si l'on veut, de ramener toujours cette longueur à une température constante.

En partant des nombres qui mesurent les dilatations absolues du cuivre et du platine, entre 0° et 100°, on voit que la dilatation apparente du premier métal par rapport à celle du second est d'environ la 1200e partie de sa longueur. Si l'on admet 10 pieds ou 1440 lignes pour la longueur totale de la règle en cuivre à 0°, l'intervalle des deux points fixes devait être sensiblement égal à 1 ligne et 2 dixièmes de ligne, soit un peu plus de 2mm,7. C'est ce très petit intervalle qu'il eût fallu diviser en 100 parties égales, pour pouvoir apprécier, comme on l'a dit plus haut, une variation de 1° centigrade dans la température. On se bornait à effectuer une division réelle, soit en 5, soit en 10 parties, puis à adapter à l'extrémité de la règle de cuivre un vernier permettant de lire, au microscope, les vingtièmes ou les dixièmes des divisions tracées[1].

1. Nous avons eu plusieurs fois l'occasion de parler de l'usage du vernier, pour la mesure des petites parties d'une ligne, droite ou courbe, lorsque ces parties ont une longueur moindre que celle d'une des divisions de la règle employée. Pour ceux de nos lecteurs qui ne connaîtraient point l'usage de ce procédé d'évaluation et d'approximation, ou qui l'auraient oublié, nous allons rappeler en quoi il consiste.

Prenons pour exemple le cas où il s'agit de mesurer la longueur cherchée *à un dixième près* de la plus petite division de la règle. Soit LL′ (fig. 230) cette règle, et 0, 1, 2..... les divisions tracées sur son arête. Le vernier VV′ est une règle plus petite, dont la longueur totale embrasse 9 divisions de la première, et qui a été divisée exactement en 10 parties égales, de sorte qu'une de ses divisions vaut les $\frac{9}{10}$ d'une division de l'autre.

Soit AB l'extrémité de la ligne qu'il s'est agi de mesurer, et sur laquelle on a porté la grande règle LL′; par hypothèse, la division 28 arrive seulement jusqu'en C, et il reste encore à mesurer la portion CD, moindre que l'une des divisions. Pour l'évaluer, on portera le vernier VV′ au delà des points B ou D, et l'on examinera (à la loupe, s'il est nécessaire, car ici on a exagéré à dessein les dimensions des divisions des deux règles) quel est le trait du vernier qui coïncide avec un trait de la grande règle. Dans la figure, c'est le 7e. On en conclura que la partie non mesurée CD vaut 0,7, et qu'ainsi la ligne totale qu'il s'agissait de mesurer a pour longueur 28,7. Il est aisé de s'en rendre compte, puisque le trait 6 du vernier est à droite du trait 34 de 0,1, le trait 5 l'est de 0,2.... du trait 33, et ainsi de suite. Le trait 0 [illegible] de la division 28 de 0,7.

Dans la mes[illegible]urait les intervalles de deux règles succes-

Ce qui précède suffira, croyons-nous, à donner une idée de l'ingénieuse méthode qui a permis, dans la mesure des bases géodésiques, de tenir compte de l'influence de la température sur la longueur, pendant tout le cours d'une opération. Nous y ajouterons la citation suivante, empruntée à Delambre, parce

sives à l'aide du vernier *mn* (fig. 231), dont les divisions, tracées à l'une des extrémités, étaient fixes. Une réglette mobile à coulisse portait les divisions de la grande règle. On faisait avancer cette réglette jusqu'au point voulu; le nombre entier des divisions se lisait aisément sur la partie située au delà de RR ; c'est ici le nombre 3. Cherchant alors quel

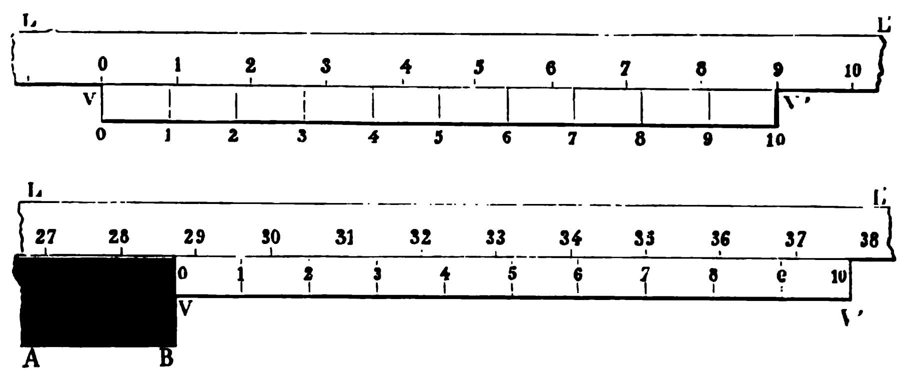
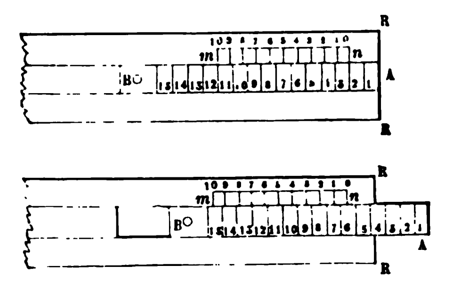


Fig. 230. — Mesure d'une longueur à l'aide du vernier.

trait du vernier coïncide avec un trait de la réglette, on trouve le nombre 7. Dès lors la portion d'intervalle mesurée était 3,7 à 0,1 près. Dans la figure, c'est le trait 2 de la réglette qui coïncidait d'abord avec le zéro du vernier et qui s'est avancé à droite de 3,7 divisions. Il en est donc de même du point A.

La figure 232 montre la disposition des deux règles de cuivre et de platine, dans l'appareil



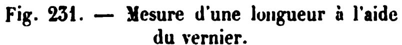


Fig. 231. — Mesure d'une longueur à l'aide du vernier.

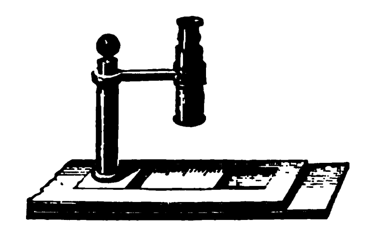


Fig. 232. — Évaluation des dilatations de la règle de cuivre dans l'appareil de Borda. Emploi du vernier.

de Borda, pour l'évaluation de la dilatation apparente du cuivre et de la température correspondante. Les divisions étaient tracées sur un tenon fixé à la règle de platine et mobile dans une rainure pratiquée le long de la règle de cuivre. C'est sur le bord intérieur de la même règle qu'étaient tracées celles du vernier, dont les indications se lisaient au moyen microscope fixé à la règle de cuivre.

qu'elle montre à quelles précautions minutieuses les opérateurs sont tenus, lorsqu'ils veulent éviter les causes d'erreur et assurer la précision de leurs mesures. Les règles dont se servait ce célèbre géomètre étaient conformes à celles qu'on vient de décrire; mais, comme leur épaisseur (à peu près 1 ligne) était trop petite pour qu'on pût les employer seules et sans garniture. elles étaient portées chacune sur une pièce de bois bien dressée, sur laquelle elle était contenue entre de petites montures qui les maintenaient sans gêner la dilatation. « Un toit, dit Delambre, recouvrait les pièces de bois, afin de garantir les règles des rayons du Soleil, qui auraient produit dans les règles de cuivre une dilatation rapide, tandis que le platine, abrité par le cuivre, se serait échauffé beaucoup plus lentement; en sorte que la marche du vernier eût indiqué pendant quelques instants une dilatation absolue et non plus l'allongement relatif. Mais sous ce toit on avait laissé quelques pouces de jour, afin que l'observateur eût continuellement la vue des règles, et qu'il pût s'apercevoir du moindre dérangement qu'elles pourraient éprouver. Il en résultait cet inconvénient que, le matin et le soir, quand le Soleil avait peu de hauteur, les rayons trop obliques n'étaient plus arrêtés par le toit, et, pour en préserver les règles, je faisais alors tendre, du côté du Soleil seulement, une bande de toile qui s'attachait au toit et réfléchissait les rayons ou les arrêtait. »

CHAPITRE V

DISTILLATION — ÉVAPORATION

§ 1. LA DISTILLATION.

Il y a deux phases dans l'opération à laquelle on donne le nom de *distillation*, laquelle a pour objet de séparer un liquide des matières étrangères qui s'y trouvent en dissolution, ou d'un autre liquide avec lequel il se trouve mélangé.

La première phase consiste à réduire le liquide à l'état de vapeur par l'ébullition. S'il contient des substances étrangères en dissolution, des sels par exemple, comme il en existe dans la plupart des eaux naturelles, eaux de source, de rivière, eau de mer, la partie aqueuse se vaporise seule ; les substances étrangères restent au fond du vase : la séparation est effectuée. S'il est mélangé avec un liquide d'une autre nature, l'ébullition les sépare encore, au moins en partie, puisque la température d'ébullition de liquides différents n'est pas la même, et qu'alors un des liquides se réduit en vapeur avant l'autre.

Comme le but qu'on se propose dans les deux cas est d'obtenir avec plus ou moins de pureté le liquide en question, il faut, après l'avoir réduit en vapeur, le faire changer d'état ou le ramener à son état primitif. C'est l'objet de la seconde phase de la distillation, et l'on y parvient aisément en condensant par le refroidissement la vapeur produite.

La distillation est une opération industrielle très anciennement connue, qui se fait au moyen d'un appareil nommé *alambic*.

C'est une chaudière *a*, nommée *cucurbite*, surmontée d'une cornue *bc* à laquelle on donne le nom de *chapiteau*. Placée sur un foyer et remplie de l'eau à distiller, elle communique en *d* avec la partie de l'appareil qu'on appelle *serpentin*, à cause de sa forme contournée en hélice. La vapeur qui se forme par ébullition au-dessus de l'eau de la cucurbite, se rend dans le serpentin et s'y condense par son contact avec les parois, sans cesse refroidies, d'une caisse où le serpentin plonge. L'*eau distillée* est reçue au dehors de la caisse dans un vase *g*. La condensation incessante de la vapeur ne peut se faire que par

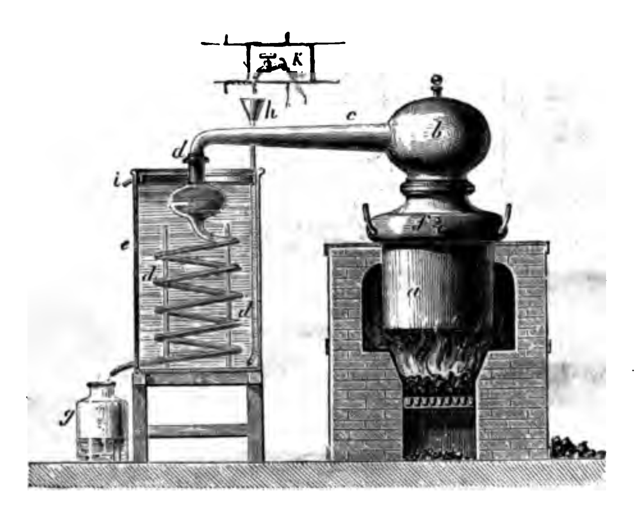


Fig. 233. — Alambic; appareil de distillation.

l'échange de la chaleur de vaporisation et l'élévation de température de l'eau de la caisse *e*. Il importe donc qu'on renouvelle l'eau froide à mesure que la distillation s'effectue ; c'est ce qu'on obtient par le robinet *k*, qui amène de l'eau froide au fond de la caisse par l'entonnoir et le tube *hd*, pendant que l'eau échauffée s'écoule à la partie supérieure par l'ajutage *i*.

L'alambic est employé sur les navires pour distiller l'eau de mer, et peut, dans une certaine mesure, procurer l'eau douce nécessaire aux besoins des équipages. L'eau ainsi distillée revient environ à un centime le litre.

L'appareil distillatoire est plus compliqué quand on a affaire

à un mélange de liquides inégalement volatils, comme sont les liquides alcooliques. Avec l'alambic ordinaire et plusieurs distillations successives, on obtiendrait bien à un certain degré de pureté le liquide concentré qu'on a en vue; mais ce liquide, l'alcool par exemple, conserverait alors un goût empyreumatique qu'il importe de détruire.

On y parvient avec un appareil tel que celui dont la figure 234 représente l'ensemble, et que nous allons décrire succinctement.

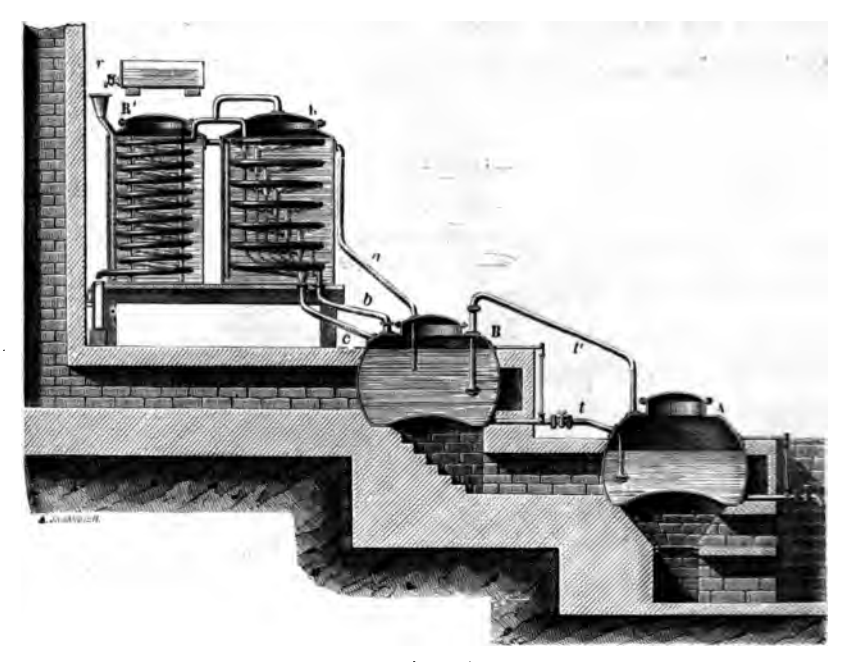


Fig. 234. — Appareil Laugier; distillation de l'alcool.

A est la chaudière directement chauffée par le foyer; B est une autre chaudière chauffée par les gaz perdus de la combustion, dont la chaleur se trouve ainsi utilisée. Deux réfrigérants R, R′ renferment des serpentins où se fait la condensation de la vapeur du liquide à distiller. C'est ce liquide, le vin par exemple, qui remplit toutes les parties de l'appareil, chaudières et réfrigérants. Il est introduit d'abord dans le réfrigérant R′, s'écoule par un tuyau de trop-plein dans R, de là par le tuyau *a* dans la chaudière B et par le tuyau *t* dans la chaudière A. La vapeur suit une marche précisément inverse. De A elle se

rend par t' dans la chaudière B ; de celle-ci, par *b*, elle passe dans R, où elle se condense en partie dans une série de tronçons d'hélice. Le liquide condensé revient en B par le tube de retour *c* commun aux hélices ; la partie non condensée de la vapeur passe au serpentin de R′ et s'y condense à son tour.

Voici comment se fait la mise en train. Quand le liquide a atteint dans la chaudière B le niveau de la pomme d'arrosoir, on suspend l'écoulement, on emplit la chaudière A aux trois quarts, et l'on chauffe. Alors, pendant que la partie la plus alcoolique s'écoule par le serpentin, la partie la plus aqueuse revient en B, dont le niveau s'accroît, tandis que celui de A baisse. Quand ce dernier est réduit au quart, on évacue par le robinet de vidange le résidu ou *vinasse*. On ouvre le robinet *t*, et A s'emplit aux dépens de B ; après quoi on reprend l'écoulement en *r*, sans désormais l'interrompre, jusqu'à ce que de nouveau B, qui reçoit du liquide de trois sources, se soit rempli et que A se soit réduit comme auparavant. On recommence ensuite l'opération indéfiniment.

La distillation du vin, celle de toutes les liqueurs fermentées tirées des céréales, froment, seigle, orge germée, maïs, des pommes de terre, des betteraves, etc., a pris une immense extension dans tous les pays d'Europe ou d'Amérique. C'est l'opération terminale d'une industrie considérable, la fabrication de l'alcool. Les appareils distillatoires sont très variés. En France et en Belgique, outre l'appareil Laugier, qu'on vient de voir, on emploie ceux de Cail, de Champonnois ; en Allemagne, ceux de Dorn, de Pistorius, de Gall et de Siemens ; en Angleterre, enfin, celui de Coffey[1], que représente la figure 235. Nous renvoyons au *Dictionnaire de chimie* de Wurtz pour la description de ces appareils, dont il suffisait ici de faire connaître le principe physique

1. « Pour donner une idée des dimensions d'un appareil de Coffey, nous n'avons qu'à mentionner que MM. Currie, à Bow, près de Londres, y obtiennent annuellement plus de 4 675 000 litres d'alcool à 65 degrés (*overproof*) par la distillation du moût fermenté d'orge et d'avoine avec addition de malt. Cette seule maison paye à l'État plus de 400 000 livres sterling (10 millions de francs) de droits par an. » (*Dictionnaire de chimie*, art. Alcools.)

Les appareils que nous venons de décrire sont employés dans la grande industrie qui a pour objet la distillation et la rectification des alcools. Dans les laboratoires de chimie, où l'on a souvent besoin de purifier un corps volatil, de le séparer des parties fixes qu'il tient en dissolution, c'est à la distillation qu'on a recours, et les appareils qui servent à cet usage ont une disposition assez simple, ainsi qu'on le voit par les figures

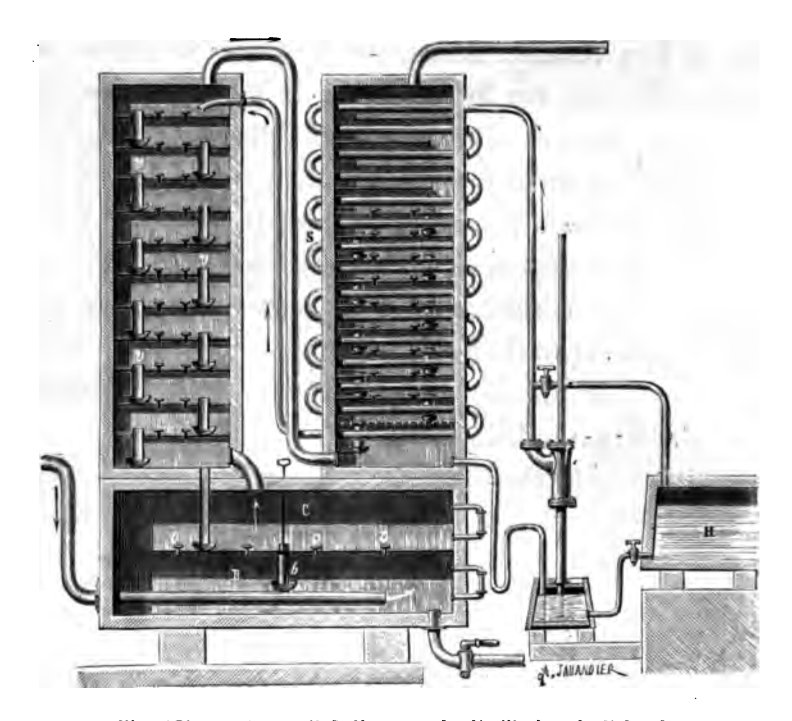


Fig. 235. — Appareil Coffey pour la distillation de l'alcool.

236 à 240. Des ballons en verre A et C, reliés par des tubes qui jouent le rôle du serpentin et qu'un courant continu d'eau froide enveloppe pendant l'opération, sont les pièces essentielles, dont les dimensions, la forme et les matériaux usités pour les relier varient avec la nature et la quantité du liquide, sa volatilité plus ou moins grande et son action chimique sur la matière des vases et des tubes. S'agit-il, par exemple, de liquides corrosifs, qui attaquent les composés organiques, on ne devra employer ni liège ni caoutchouc dans l'appareil, et

les joints se feront à l'aide de pièces de verre s'emboîtant à l'émeri ou non suivant les cas.

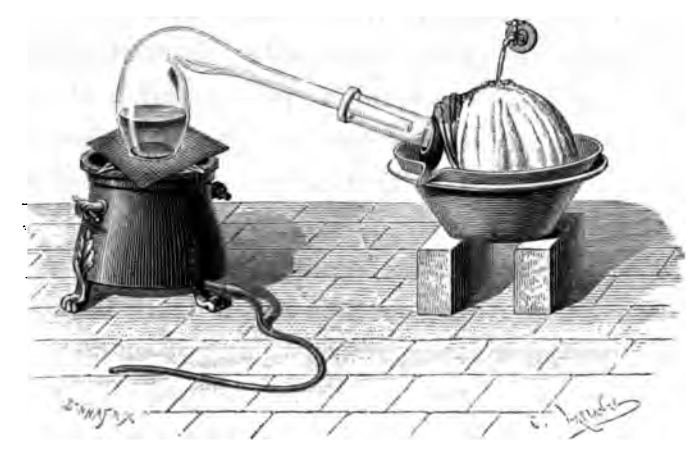


Fig. 236. — Appareil à distiller.

Il arrive, pour certains corps, que la distillation ne peut s'opérer à la pression ordinaire, parce que la température à

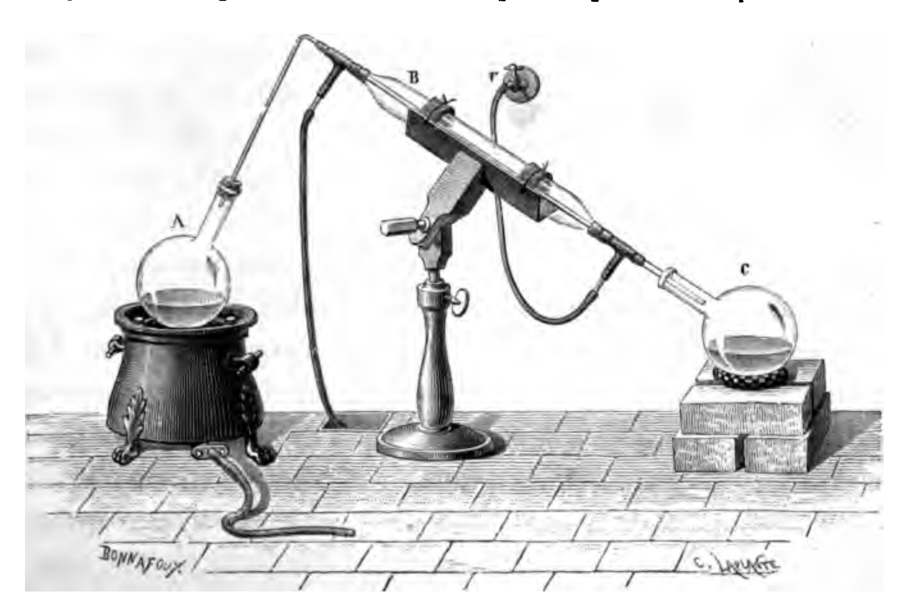


Fig. 237. — Appareil à distiller.

laquelle il faut alors les soumettre les décompose partiellement. Dans ce cas, on opère à une pression moindre ou même dans le vide. I comment on dispose l'appareil.

On se sert comme générateur d'un ballon, que l'on chauffe au bain d'huile; le produit de la distillation est recueilli dans une éprouvette plongée dans un vase d'eau froide; cette éprouvette est reliée à un gros ballon qu'un tube de caoutchouc met en communication avec une machine pneumatique, et qui sert à régulariser la pression. Dès que le vide est poussé au degré convenable, on ferme le robinet de communication et on laisse s'effectuer la distillation.

Quand on veut séparer les liquides inégalement volatils dont se compose un mélange, c'est encore à la distillation qu'on a recours, et l'expérience réussit d'autant mieux qu'il y a un intervalle plus grand entre les points d'ébullition de ces liquides. Toutefois la séparation est généralement incomplète, et si l'on fait trois parts du produit de la distillation, la première recueillie est celle qui contiendra la plus forte proportion du liquide le plus volatil; la dernière sera plus riche au contraire en parties du liquide ayant le point d'ébullition le plus élevé, et la portion moyenne se rapprochera le plus du mélange primitif. En procédant ensuite de la même manière sur les deux fractions extrêmes, on obtiendra de nouveau deux mélanges encore plus riches en chacun des deux liquides, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive à une séparation à peu près totale. C'est ce qu'on nomme la *distillation fractionnée*.

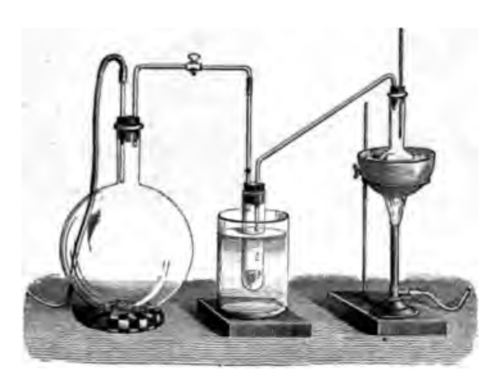


Fig 238. — Appareil pour distiller dans le vide.

Ce mode d'opération ne réussit pas toujours à la pression ordinaire. On emploie alors le procédé de distillation dans le vide, tel que nous l'avons décrit plus haut. Supposons qu'il s'agisse d'un mélange d'alcool et d'éther; la quantité d'alcool qui passera à la distillation sera d'autant moindre qu'elle sera

effectuée à une température plus basse. Or la diminution de pression a précisément pour effet d'abaisser le point d'ébullition. De là l'utilité de faire dans l'appareil distillatoire un vide plus ou moins parfait.

On arrive aussi au même but en disposant les appareils d'une façon spéciale. Une des dispositions les plus simples est celle que représente la figure 239, et qui est due à M. Wurtz.

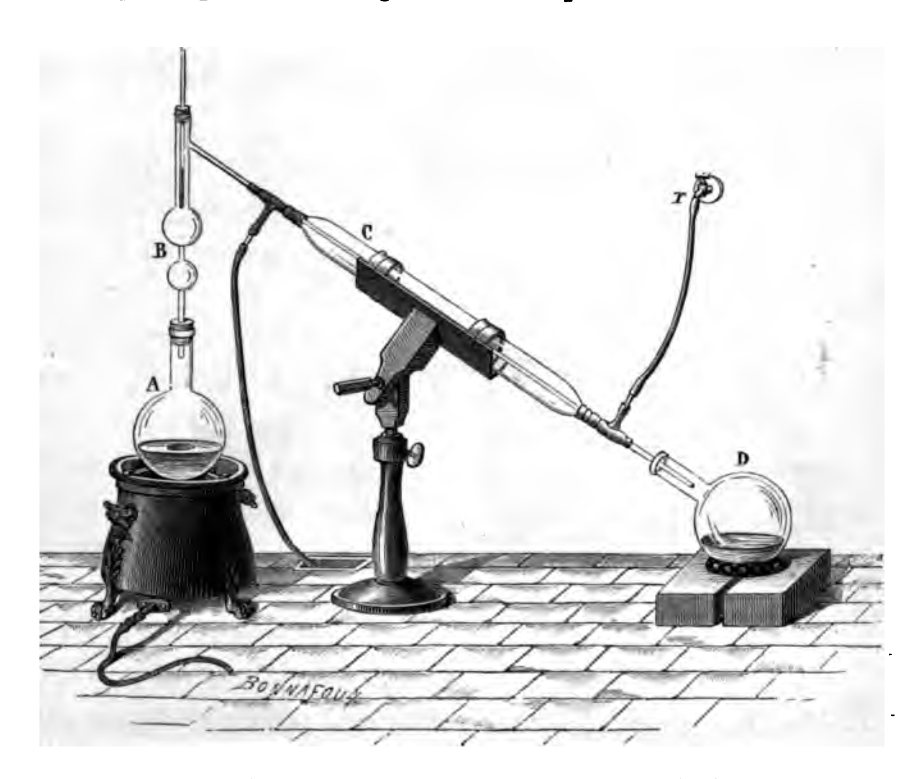


Fig. 239. — Appareil de Wurtz à boules, pour la distillation.

C'est un tube assez gros, sur la longueur duquel on a soufflé deux boules B et soudé un tube latéral. On l'adapte au ballon A qui sert de générateur. La vapeur qui le traverse se condense partiellement à la surface interne des boules et retourne dans le ballon, tandis que la partie la plus volatile, se dégageant par le tube latéral, est condensée dans le réfrigérant C, pour se rendre de là dans le récipient D. Une seule distillation permet ainsi de séparer un mélange beaucoup mieux que la distillation avec

une cornue ordinaire, mais il faut chauffer davantage, parce qu'une grande partie du liquide retourne dans le générateur avant d'être définitivement distillée.

Quand on veut concentrer des solutions à basse température, on emploie la distillation dans le vide, et l'on se sert alors de l'appareil représenté dans la figure 240. Voici la signification et l'usage de ses diverses parties : A ballon contenant la solution ; R, réfrigérant ; F, flacon récipient, mis en communication par un tube de caoutchouc avec la trompe à vide T ; *m*,

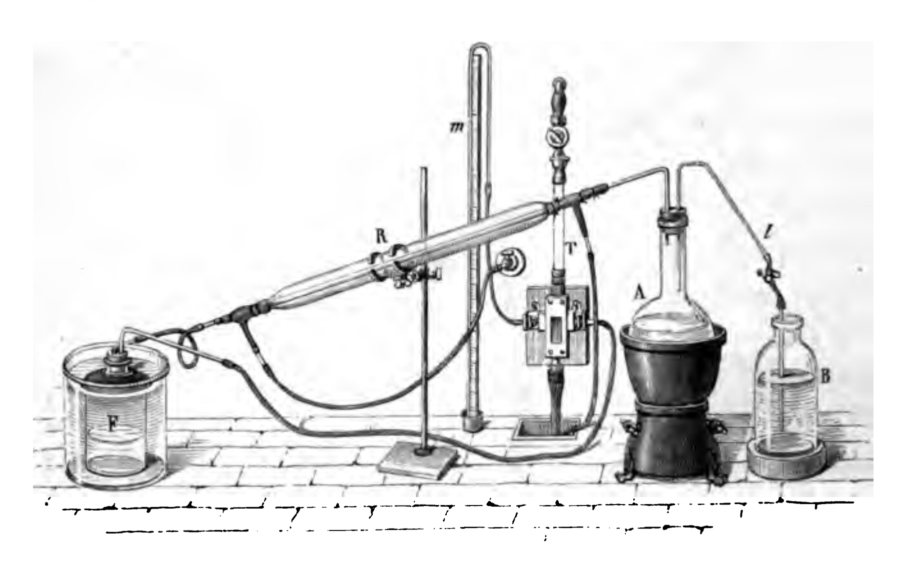


Fig. 240. — Appareil pour la concentration des dissolutions dans le vide.

manomètre indiquant le degré de vide ; B, flacon servant à l'alimentation du ballon A par l'intermédiaire du siphon à robinet *l*.

Quand on veut connaître la richesse alcoolique d'un vin, c'est encore à la distillation qu'on a recours. A l'aide d'opérations fort simples et d'appareils dus à Gay-Lussac et à M. Salleron, on réduit le vin à n'être plus qu'un mélange d'eau et d'alcool. Tous les autres principes, sels, acides, tannin, matières colorantes, etc., qui entrent dans la composition du vin, s'en trouvent séparés. Dès lors, en plongeant l'alcoomètre centésimal dans le mélange, on peut, par un calcul simple, en conclure la richesse en alcool du vin mis en expérience.

§ 2. ÉVAPORATION. — MARAIS SALANTS ET SALINES. — ALCARRAZAS. FABRICATION DE LA GLACE AU BENGALE.

Une grande partie du sel (chlorure de sodium) nécessaire à la consommation provient des eaux de la mer, où il entre dans la proportion de $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{34}$ environ[1]. C'est par évaporation à air libre, dans de larges bassins peu profonds, qu'on arrive à concentrer peu à peu l'eau marine, et le sel se dépose au fond des



Fig. 241. — Marais salants de l'Ouest.

bassins sous forme de cristaux, et à la surface de l'eau en une couche mince solide. L'évaporation est activée par l'élévation de température due aux rayons solaires et par le vent. Aussi est-ce dans la saison chaude que l'on récolte le sel dans les marais salants et qu'on exécute la série de manipulations très

1. Cette proportion varie d'une mer à l'autre. Le nombre $\frac{1}{34}$ est relatif à l'eau de la Méditerranée; $\frac{1}{40}$ à l'eau de l'océan Atlantique. Dans la mer d'Azof, l'eau ne contient guère plus de 1 centième de sel marin. Dans tous ces nombres n'entrent point les autres substances fixes dissoutes dans l'eau de mer, telles que les chlorures de magnésium et de calcium, les bromures de magnésium et de sodium, etc.

simples qui constituent cette industrie. Le sel est ramassé en tas, qu'on laisse exposés à l'air un certain temps, pour permettre aux substances déliquescentes qui s'y trouvent mélangées de se dissoudre : le sel ainsi égoutté est ensuite livré au commerce.

Les figures 242 et 243 représentent, en plan, deux marais

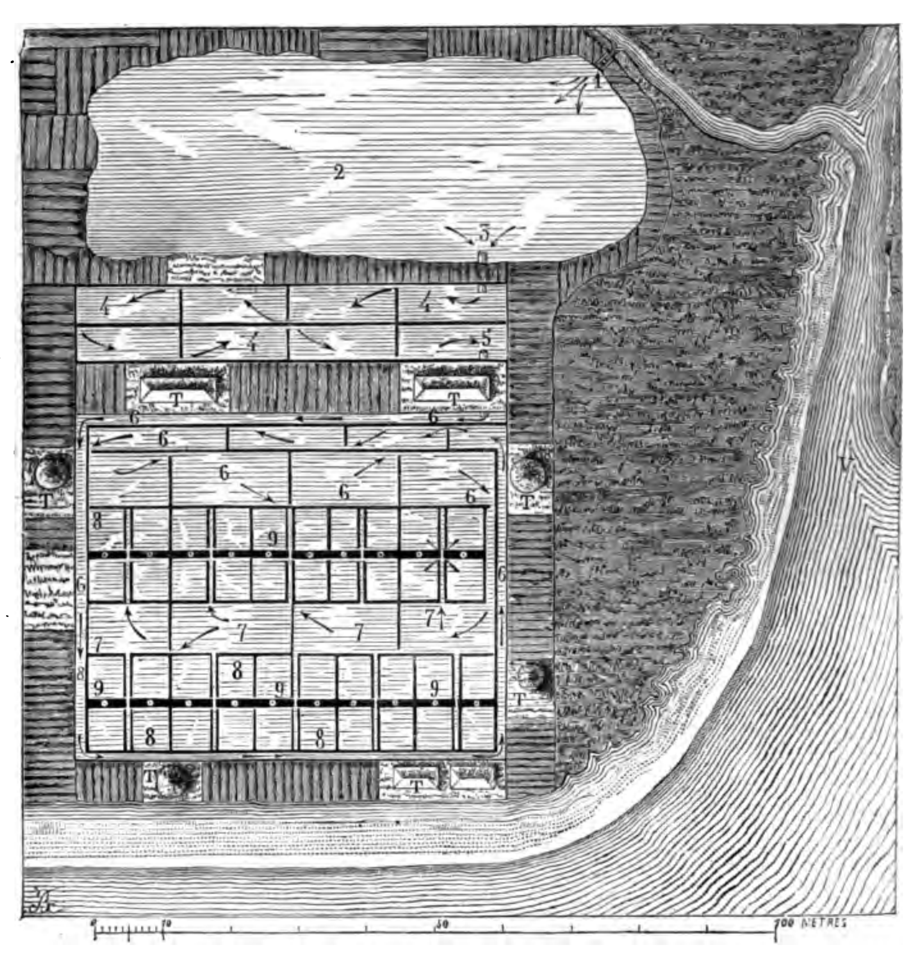


Fig. 242. — Plan d'un marais salant de l'Ouest.

salants : le premier indique la disposition adoptée sur les côtes de la Manche et de l'Océan, où l'on utilise les marées pour remplir, aux heures de la haute mer, le *jas* ou *vasière*, grand réservoir dont le niveau domine celui des autres bassins du marais. L'eau passe de là dans les *conches*, compartiments

rectangulaires (4, 5), d'où elle se rend dans les *mors*, *fares* et *adernes* (6, 6, 6, 7) en suivant la route marquée par les flèches de la figure. Arrivée là, elle pénètre par des canaux étroits dans les *œillets* ou cristallisoirs (8, 9). Quand la saison (de mai à septembre) est favorable, la concentration de l'eau salée dans les fares et adernes se fait avec rapidité et le sel se dépose en cristaux dans les œillets. On le recueille dans de petits tas, qu'on dépose sur les digues ou *ponts* qui séparent les compar-

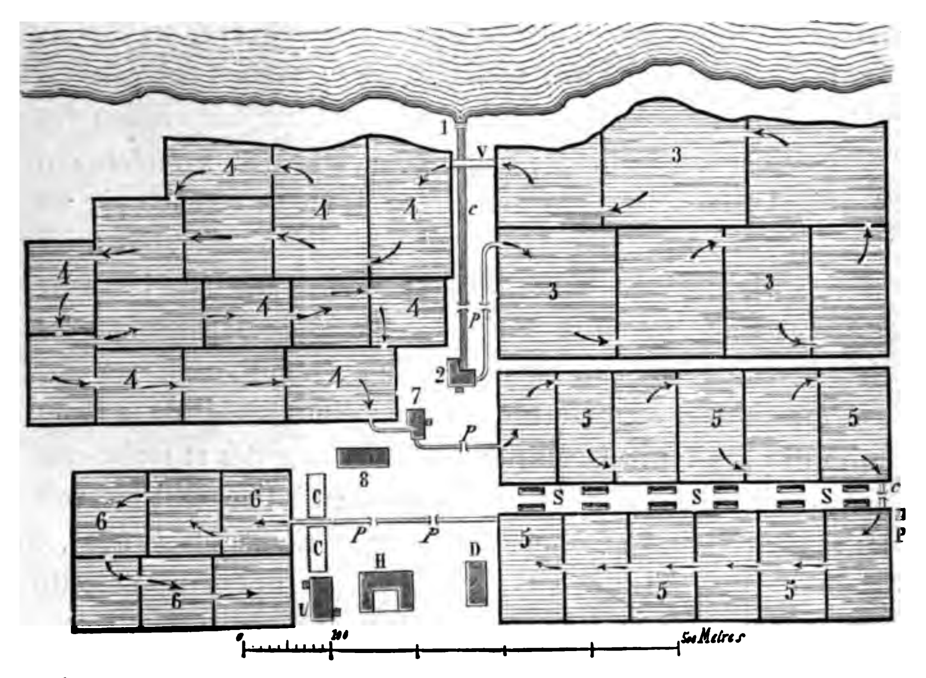


Fig. 243. — Plan d'un salin du Midi.

timents des œillets les uns des autres. Une fois égouttés, ces tas sont réunis en tas plus gros TT, qu'on recouvre d'une couche de terre glaise. Le sel qu'on obtient ainsi est le *sel gris ;* on le raffine en le dissolvant dans l'eau, et en précipitant la magnésie par la chaux. Puis, après l'avoir filtrée, on évapore la dissolution dans des chaudières.

Les *salins* ou marais salants du Midi sont disposés autrement que ceux de l'Ouest, à cause de l'absence de marée dans la Méditerranée. Ils sont divisés en deux ou trois étages nom-

més *partènements*. L'eau arrivant par une pente naturelle dans les partènements extérieurs (3, 3) y subit d'abord une première concentration ; de là on la fait passer dans les bassins (4, 4) ou partènements intérieurs, et enfin de ceux-là dans les bassins de dépôt ou *tables salantes* (5, 5). Au lieu d'élever l'eau d'abord dans les bassins de l'étage le plus élevé, pour la conduire de là dans les étages inférieurs, on adopte la méthode inverse, parce qu'elle exige évidemment une moindre force motrice, la quantité d'eau à élever allant en diminuant à mesure que l'évaporation la concentre davantage. On voit sur la figure, en 2 et 7, les pompes à vapeur qui servent à ces élévations successives.

On obtient encore le sel en l'extrayant par évaporation des eaux des sources salines; mais, comme ces eaux renferment d'ordinaire une faible proportion de sel, on commence par les concentrer en leur faisant subir une première évaporation à air libre, après quoi on achève l'opération en soumettant les eaux concentrées à l'action de la chaleur. Le sel se dépose dans les chaudières où s'effectue cette seconde opération.

L'évaporation à air libre des eaux salines se fait de la façon suivante : Des tas de fagots (fig. 244) sont empilés et maintenus par une charpente au-dessus du bassin où l'on veut recevoir les eaux ; celles-ci s'échappent, par une série d'ajutages *a*, *a*..., de deux auges AB, CD, situées à la partie supérieure de cette construction, à laquelle on donne le nom de *bâtiment de graduation*, et qu'on oriente de manière que sa direction longitudinale soit perpendiculaire à celle du vent le plus fréquent. L'eau s'écoule ainsi en se disséminant à travers les branches et les petits rameaux des fagots, de sorte qu'elle est forcée de présenter une grande surface à l'air libre; l'évaporation s'effectue donc avec une grande rapidité, et l'eau du bassin est plus concentrée que celle des sources. On la ramène une seconde, une troisième fois à l'aide de pompes P, P′, jusqu'à ce que le degré de concentration soit suffisant, et l'on achève l'évaporation dans les chaudières.

Tout le monde connaît ces vases de terre poreuse auxquels

on donne le nom d'*alcarrazas*[1], et qui servent à tenir l'eau fraîche en été. La propriété qu'on recherche en ces sortes de carafes est due au froid qui résulte de l'évaporation du liquide à la surface extérieure. L'eau qui pénètre à travers les parois, et qui s'évapore d'autant plus rapidement que l'air extérieur, plus chaud, est moins saturé de vapeur, est successivement remplacée par de l'eau nouvelle. L'abaissement de température

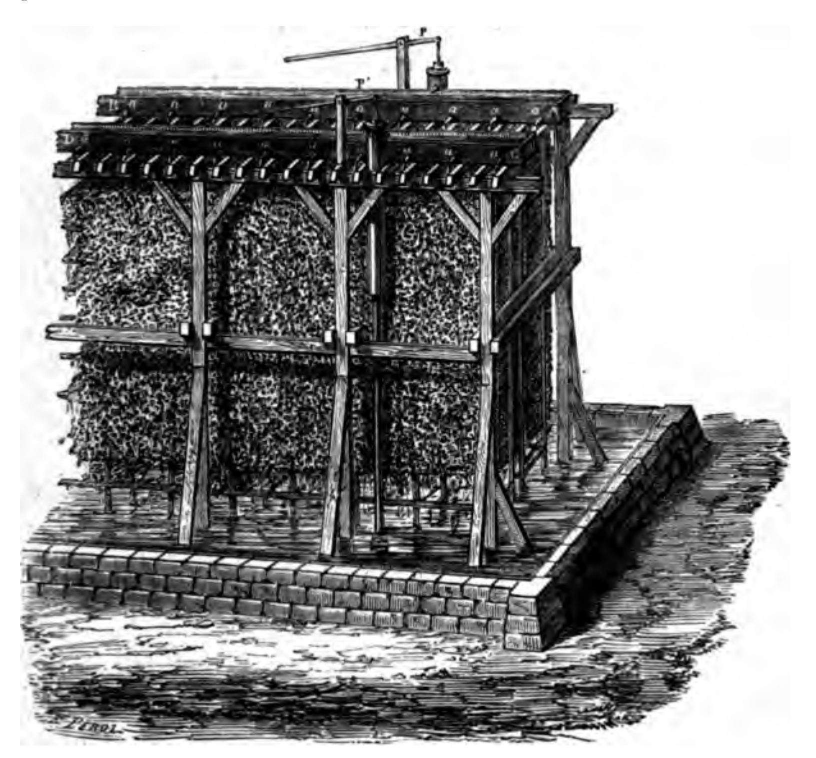


Fig. 244. — Bâtiment de graduation pour l'évaporation des eaux salines.

qui résulte de cette évaporation empêche l'eau de l'alcarraza de s'échauffer, comme il arriverait si les parois du vase étaient imperméables.

C'est cette évaporation, si abondante et si rapide par les nuits claires, qui donne lieu à la formation de la rosée, condensation de la vapeur d'eau de l'air en petites gouttelettes à la surface des corps terrestres. Quand le froid qui en résulte est assez intense, les gouttes se gèlent et produisent la gelée

1. Mot espagnol, *alcarraza*, tiré lui-même de l'arabe *al-quraz*, cruche.

blanche. Au Bengale, où la température est trop élevée pour qu'il se forme jamais naturellement de la glace, on en obtient artificiellement de la façon suivante. Voici en quels termes Tyndall rend compte du procédé usité, et de la cause du phénomène physique dont ce procédé est une application :

« Wells (auteur de la *Théorie de la rosée*) fut le premier, dit-il, qui expliqua la production artificielle de la glace au Bengale, où elle ne se forme jamais naturellement. On creuse des fossés peu profonds que l'on remplit en partie de paille, et sur la paille on expose au ciel pur des bassins plats contenant de l'eau qu'on a fait bouillir. L'eau a un grand pouvoir de radiation ; elle envoie en abondance sa chaleur dans l'espace, et la chaleur ainsi perdue ne peut pas être remplacée par la chaleur de la terre, que la paille, non conductrice, arrête au passage. Le soleil n'est pas levé, que déjà de la glace s'est formée dans chaque vase. Telle est l'explication de Wells, et c'est sans aucun doute l'explication véritable. Je pense toutefois qu'elle a besoin d'un complément. Il paraît, d'après les descriptions venues jusqu'à nous, que la condition la plus propice à la formation de la glace n'est pas seulement un ciel pur, mais aussi une atmosphère sèche. « Les nuits, dit sir Robert Baker, les plus favorables à la production de la glace sont celles qui sont les plus claires et les plus sereines, et pendant lesquelles *il apparaît très peu de rosée après minuit*. J'ai écrit en italique cette phrase très significative. Pour produire de la glace en abondance, l'atmosphère ne doit pas seulement être claire, elle doit en outre être comparativement privée de vapeur d'eau. Quand la paille sur laquelle reposaient les bassins devenait humide, on la remplaçait par de la paille sèche ; et la raison que Wells assignait à cette pratique, c'est que la paille, mouillée et devenue plus compacte, agissait comme corps conducteur. Cela peut être ; mais il est certain aussi que la vapeur d'eau, en s'élevant de la paille humide et en se répandant au-dessus des bassins, serait devenue un écran qui aurait arrêté le refroidissement par rayonnement et retardé la congélation. »

Les petits dépôts de glace qu'on recueille ainsi, avant l'aube, dans les vases exposés au rayonnement, ne sont pas, on le comprend, bien considérables. Comme le dit M. Louis Rousselet dans une notice où il rend compte de la façon dont on obtient la glace dans l'Inde, « ce n'est le plus souvent qu'une mince pellicule, mais tous ces fragments combinés réussissent à former une glace assez compacte. Cette glace est transportée aussitôt dans des glacières pratiquées sous le sol, où elle se conserve pendant un temps assez long. »



Fig. 245. — Récolte de la glace dans l'Inde.

Le procédé ainsi employé pour la formation et la récolte de la glace est sujet à des inconvénients qui font préférer la glace en blocs, telle qu'elle est expédiée directement aux Indes des lacs de l'Hudson ou de l'Ontario. La première est toujours mélangée de débris de paille et de poussière, ce qui ne permet pas de l'employer directement pour rafraîchir les boissons. Elle sert seulement pour maintenir à une basse température les vases qui contiennent les liquides eux-mêmes. Du reste, la quantité qu'on peut obtenir ainsi par l'évaporation naturelle

ou au grand air, est loin de suffire aux besoins croissants de la consommation de la glace, dont l'usage est aujourd'hui si répandu chez les nations civilisées.

On se sert en effet de la glace, non seulement pour rafraîchir, en été, les boissons de toute sorte, pour fabriquer les sorbets, les crèmes, mais aussi en médecine et en chirurgie pour le traitement de certaines maladies ou le pansement des plaies[1]. Aussi la consommation en est-elle considérable en Europe et

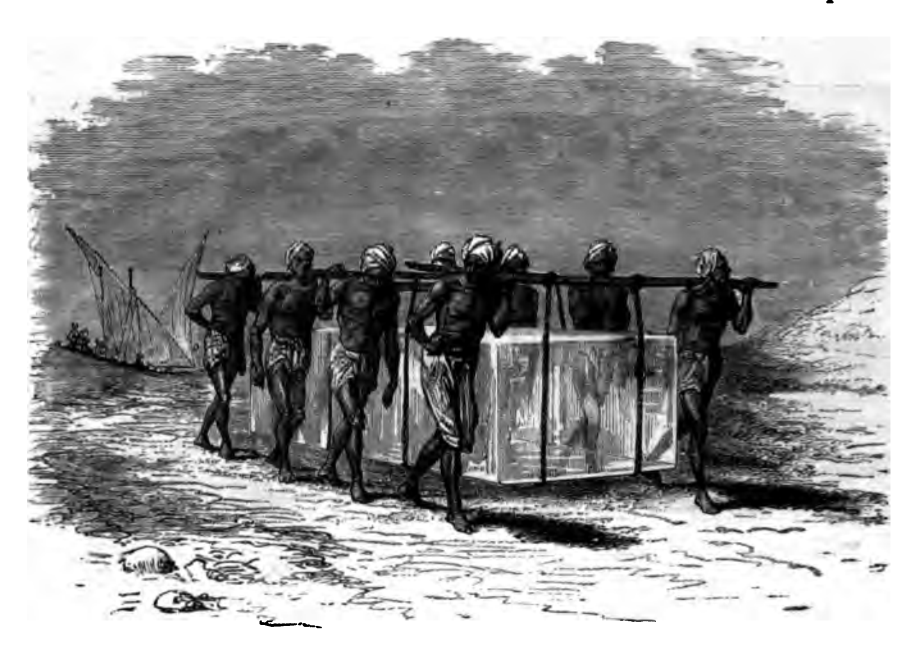


Fig. 246. — Transport de la glace américaine dans les rues de Bombay.

dans les autres parties du monde. On la recueille en blocs en Russie, en Suède et en Norvège, au Canada à la surface des lacs, et des navires la transportent partout dans les pays méridionaux, comme nous venons de voir que les Américains le

1. « La glace, dit M. Buignet, constitue une des ressources les plus précieuses dont la thérapeutique puisse disposer pour produire les effets de la médication sédative. Le froid auquel elle donne lieu est employé avec succès dans les cas d'inflammation ou d'hémorragie, dans les méningites, dans les fièvres typhoïdes à forme cérébrale, etc. Il est donc nécessaire que le pharmacien soit toujours en mesure de fournir de la glace, en été comme en hiver, dans les villes pourvues de glacières, comme dans les localités privées de ressources; et, à défaut de la glace naturelle, il est nécessaire qu'il fournisse de la glace fabriquée artificiellement. » (*Manipulations de physique.*)

font dans l'Inde. Pour transporter ces blocs sans que la température plus clémente des régions à traverser les fonde, on les empile dans des caisses, par couches qu'on entoure et qu'on sépare avec de la sciure de bois : la faible conductibilité de cette matière suffit pour protéger la glace pendant son voyage. A son arrivée, on la recueille dans des glacières, d'où elle est extraite ensuite au fur et à mesure des besoins.

Dans la fabrication du sucre de betteraves, quand le jus a été purifié et filtré, il doit subir une forte concentration, afin que le sucre dissous puisse cristalliser. Cette concentration a lieu en deux opérations, dont la première consiste à réduire le jus, par évaporation, à la moitié environ de son volume primitif, et à le transformer en *sirop*. 100 kilogrammes de jus fournissent en moyenne 26 kilogrammes de sirop, de sorte que l'évaporation a eu lieu sur 74 kilogrammes d'eau. Autrefois on chauffait le jus dans des chaudières à air libre et dès lors sous la pression de l'atmosphère. Dans ces conditions, la température, étant trop élevée, donnait lieu à un grave inconvénient : sous l'action de la chaleur, le liquide se colorait en brun, indice de la transformation d'une partie de sucre cristallisable en sucre incristallisable. Pour remédier à cet inconvénient, on a imaginé des appareils où la concentration se fait à une pression inférieure, ou dans le vide. Il en résulte, pour la température d'ébullition des jus, un degré moins élevé, qui ne permet plus de craindre l'altération du sucre. En outre, la concentration est plus rapide, dès lors plus économique. Les figures 247 et 248 représentent deux des appareils fondés sur cette méthode d'évaporation et principalement usités en France.

Dans l'appareil Derosne et Cail, A est la chaudière qui renferme le sirop à concentrer. La vapeur produite se rend, par le tuyau B, dans un serpentin en cuivre C, contenu dans la partie moyenne d'une grande cuve. Du sirop froid coule sur les spires du serpentin d'un réservoir supérieur D, abaisse la température de la vapeur et facilite ainsi l'ébullition. Ce sirop

s'échauffe d'ailleurs lui-même et tombe dans le réservoir inférieur E, d'où il est refoulé dans la chaudière. L'extrémité K du

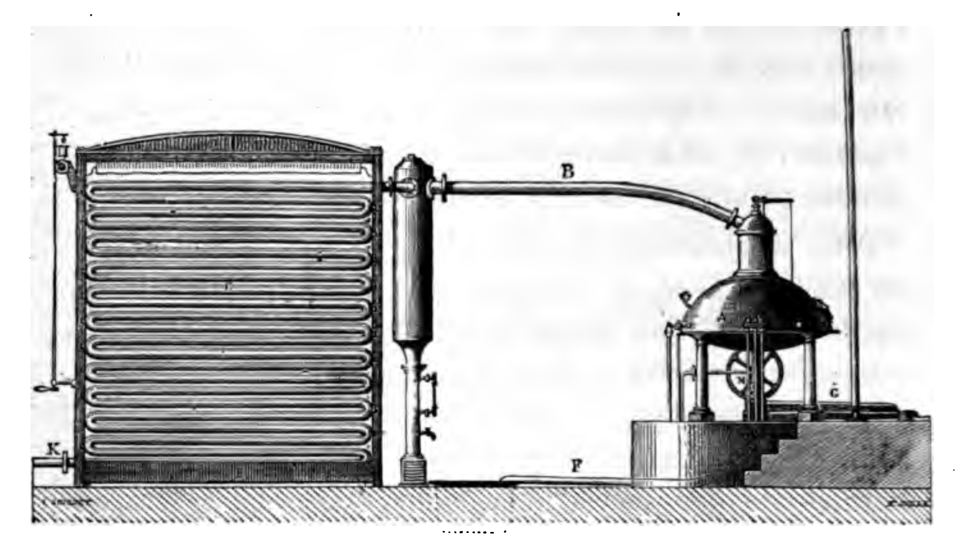


Fig. 247. — Appareil Derosne et Cail pour la concentration des sirops.

serpentin est mise en communication avec une pompe qui

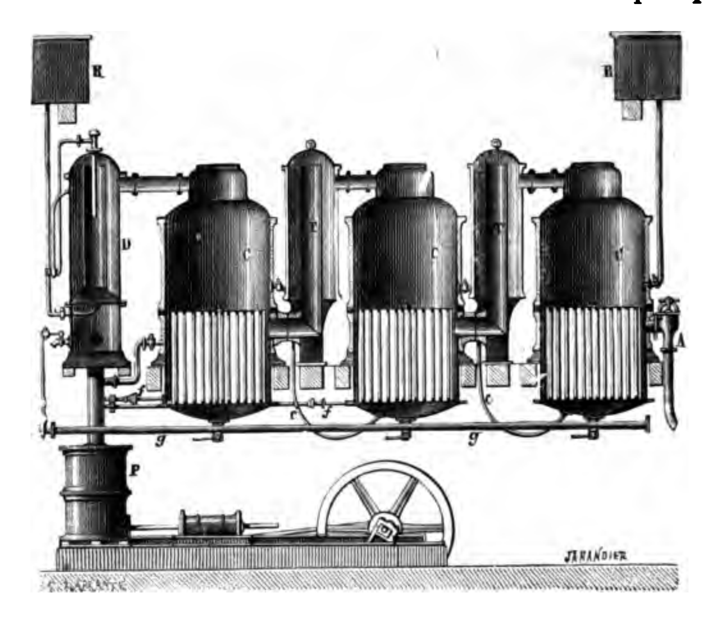


Fig. 248. — Appareil à triple effet de Cail pour la concentration des sirops.

aspire l'air et la vapeur et fait ainsi le vide à l'intérieur de la chaudière, ce qui abaisse la température d'ébullition du liquide.

L'appareil à triple effet de Cail (fig. 248) se compose de trois chaudières verticales CCC, de même hauteur, dont l'intérieur est partagé par deux cloisons horizontales en trois compartiments inégaux. Un certain nombre de tubes verticaux (60 ou 80) mettent en communication les compartiments inférieur et supérieur et permettent au jus à évaporer de passer librement de l'un à l'autre. Le jus ne peut donc pénétrer dans le compartiment du milieu où circule la vapeur qui sert au chauffage des chaudières. La pompe P fait le vide dans la première chaudière de droite, y réduisant la pression atmosphérique d'un quart. Le jus amené du réservoir R dans cette chaudière y entre en ébullition à 80° ou 90°. La vapeur qu'il émet passe dans un réservoir ou arrive dans un tube T. De là elle passe dans la seconde chaudière, dont elle échauffe le sirop, qui entre en ébullition entre 50° et 60°. Elle passe de même dans la troisième chaudière, pour aller se concentrer en D, au contact de l'eau froide qui s'y trouve amenée par des tubes. Cette condensation contribue à entretenir le vide dans les chaudières, vide dont le degré va en croissant de la première à la troisième, d'où résulte aussi la décroissance de la température d'ébullition dans les chaudières successives.

CHAPITRE VI

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

§ 1. MÉLANGES RÉFRIGÉRANTS.

Le procédé usité dans l'Inde pour se procurer de petites quantités de glace n'est pas applicable partout ni en toutes saisons. D'autre part, la récolte de la glace naturelle sur les étangs ou les lacs est subordonnée au plus ou moins de rigueur de la saison d'hiver dans les pays où elle est possible. Les blocs doivent être ensuite transportés, à grands frais, dans les lieux de consommation, et emmagasinés dans des glacières, d'où on les tire au fur et à mesure des besoins. Tout cela nécessite des dépenses qui font revenir assez cher le prix d'un kilogramme de glace. Aussi a-t-on cherché des moyens de fabriquer artificiellement la glace et des procédés assez économiques pour rendre cette fabrication vraiment industrielle. Cette question toute pratique se rattache au problème beaucoup plus général de la production du froid, dont nous allons d'abord dire quelques mots.

Nous avons vu, dans le chapitre de la Première Partie qui traite de la liquéfaction des gaz, qu'on peut obtenir un grand abaissement de température soit par une évaporation rapide d'un liquide soumis à une faible pression, soit par une brusque détente d'un gaz fortement comprimé, soit par le contact avec un mélange de substances chimiques dont l'une au moins est solide et subit la fusion sous l'influence de son affinité pour

l'autre. Dans tous les cas, il s'agit, comme on voit, d'une absorption de chaleur plus ou moins considérable, absorption nécessitée par le travail mécanique qu'exige un changement d'état. Cette quantité de chaleur, ne pouvant être immédiatement fournie par les corps qui sont le siège de ce changement d'état, est empruntée au milieu ambiant, dont la température se trouve ainsi plus ou moins abaissée.

C'est à l'un ou à l'autre de ces modes de production du froid que se sont adressés ceux qui ont cherché des procédés de





Fig. 249. — Sorbetière.



Fig. 250. — Glacière Goubaud.

fabrication de la glace. Parlons d'abord de l'emploi des *mélanges réfrigérants*, que les chimistes et les physiciens utilisent depuis longtemps dans leurs laboratoires. Ces mélanges sont nombreux. Citons quelques-uns des plus usités :

2 parties en poids de glace pilée ou de neige avec 1 partie de sel marin (ou chlorure de sodium); les deux sels prennent l'un et l'autre l'état liquide, et le thermomètre plongé dans la dissolution descend à 19°, ou même à 20° au-dessous de zéro.

3 parties de glace pilée ou de neige, mélangées avec 4 par-

ties de chlorure de calcium, permettent d'atteindre un froid de — 50°.

Dans ces deux mélanges, la cause du refroidissement est double. L'affinité de l'eau liquide pour l'un ou l'autre sel détermine la double liquéfaction ; l'eau doit d'abord se liquéfier pour que cette affinité puisse s'exercer. De là une première absorption de chaleur, nécessitée par le travail mécanique de la fusion de la glace ou de la neige ; puis une nouvelle absorption, résultant de la liquéfaction des sels.

Un autre mélange réfrigérant fréquemment employé est celui qu'on forme avec 8 parties de sulfate de soude cristallisé et 5 d'acide chlorhydrique concentré. Le sulfate de soude doit

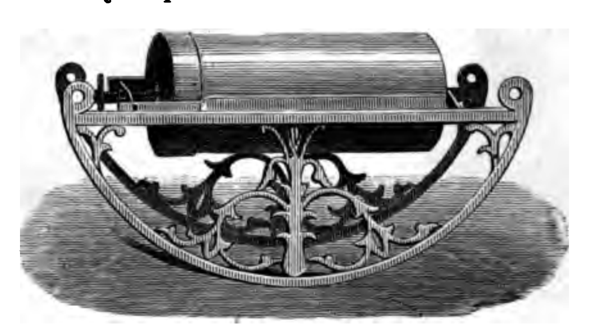


Fig. 251. — Glacière à bascule.

être finement pulvérisé. On le voit fondre rapidement, et le thermomètre plongé dans le mélange s'abaisse à 27° environ au-dessous de sa température initiale. Ici l'abaissement de température est dû à diverses causes, notamment à la liquéfaction de l'eau de cristallisation du sulfate de soude[1].

Voici d'autres mélanges d'un sel avec un acide :

1. D'après M. Berthelot, « les mélanges réfrigérants constitués par des sels hydratés, associés aux acides, aux bases ou à d'autres sels, sont réglés par la théorie suivante : le phénomène anormal que ces mélanges manifestent résulte du concours des énergies chimiques avec des énergies étrangères. Les énergies chimiques agissent conformément au principe du travail maximum, pour déterminer une première réaction exothermique, dont toutes les autres sont la conséquence. Les énergies calorifiques interviennent ensuite en sens inverse pour déterminer une absorption de chaleur, sous sa quadruple forme de dissociation (sulfate de soude hydraté), de désagrégation par le dissolvant (équilibre entre le bisulfate de soude et l'eau), de dissolution (laquelle ne joue qu'un rôle intermédiaire dans le cas du sulfate de soude et de l'acide chlorhydrique concentré), enfin de liquéfaction (eau de cristallisation). » (*Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1880, t. I.)

3 parties de sulfate de soude et 2 d'acide azotique étendu : refroidissement de 29°.

9 parties de phosphate de soude et 4 d'acide azotique étendu : abaissement de température, 39°.

6 parties de sulfate de soude, 5 d'azotate d'ammoniaque et 4 d'acide azotique étendu : 36°.

On sait enfin que l'azotate d'ammoniaque est un sel blanc, solide, qui cristallise parfaitement et est très soluble dans l'eau. Si l'on fait un mélange de 1 partie de ce sel, finement pulvérisé, avec 1 partie d'eau distillée, la fusion se fait presque instantanément, en déterminant un abaissement de 20° au-dessous de la température ambiante. Si cette dernière est 10°, le froid produit est de 16° au-dessous de zéro.

Voyons maintenant quelques applications industrielles ou domestiques des mélanges réfrigérants. Les figures 249 à 252 représentent quelques appareils fort simples où ils sont utilisés.

Un mélange de glace pilée et de sel, contenu dans un seau où l'on plonge l'ustensile renfermant les sirops, jus ou crèmes à congeler, ou, selon l'expression technique, à transformer en sorbets, constitue le plus simple de ces appareils : c'est la *sorbetière* (fig. 249).

Les figures 250, 251 et 252 représentent des *glacières domestiques*, toutes construites et basées sur ce principe : froid produit par la dissolution, qu'on active soit par un mouvement de bascule, soit par un mouvement de rotation imprimé au liquide réfrigérant à l'aide d'une manivelle, par des palettes en hélice entourant le vase qui contient l'eau ou le sirop à congeler. Dans la *glacière des familles*, un certain nombre de boîtes concentriques forment plusieurs compartiments, dans lesquels on introduit alternativement l'eau à congeler et le mélange réfrigérant. Dans la figure, on voit l'eau en A, B, B, et le mélange en C, O. L'eau une fois congelée, son eau de fusion s'écoule par la partie inférieure et asperge des bouteilles de vin, qui se trouvent ainsi refroidies, et, comme le disent les gourmets, *frappées à la glace.*

On doit à M. Toselli divers appareils de ce genre, parmi lesquels nous citerons la glacière qui figurait à l'Exposition universelle de 1878. Un cylindre à fonds mobiles, contenant d'un côté l'eau à congeler, de l'autre le mélange réfrigérant (azotate d'ammoniaque et eau), peut recevoir un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire à ses génératrices. Au bout de quelques minutes, on obtient un poids de glace égal au tiers du poids d'azotate employé.



Fig. 252. — Glacière des familles.

La *malle-glacière* du même inventeur est décrite en ces termes par Buignet : « La source de froid est le nitrate d'ammoniaque que l'on fait dissoudre dans l'eau, et l'appareil diffère peu de la *glacière des familles*. Ce qu'il y a de réellement nouveau dans la malle-glacière de M. Toselli, c'est la disposition particulière du récipient à glace. Ce récipient comprend cinq tubes de diamètres différents dans lesquels on place l'eau qui doit prendre l'état solide. Les diamètres de ces tubes sont tellement calculés que, quand une couche solide s'est formée sur la paroi interne de chacun d'eux, les blocs de glace qu'on

en retire forment des cylindres creux pouvant s'introduire les uns dans les autres, et constituer ainsi un bloc unique et plein, qui se maintient solide pendant très longtemps. » En cinq minutes, on obtient avec cet appareil un demi-kilogramme de glace.

Comme on peut le voir par ce qui précède, l'emploi des mélanges réfrigérants ne permet la fabrication que d'une petite quantité de glace. Pour les usages scientifiques ou domestiques, cela peut suffire, et d'ailleurs l'avantage de produire une très basse température est précieux ; mais, industriellement, ils ne peuvent fournir la solution du problème de la fabrication de la glace en grand, d'autant plus que le prix généralement élevé des mélanges s'y oppose, à cause de la difficulté qu'on éprouve à régénérer leurs éléments pour des opérations nouvelles.

§ 2. FABRICATION INDUSTRIELLE DE LA GLACE.

Les appareils de fabrication de la glace en grand sont aujourd'hui nombreux. Mais les premiers qui aient sérieusement fonctionné sont dus à un ingénieur français, M. Carré, qui songea à utiliser les propriétés de l'ammoniaque de se dissoudre abondamment dans l'eau, dans les conditions normales de pression et de température, et de se liquéfier elle-même lorsqu'on la force à se comprimer sous la pression de sa propre atmosphère. Lorsque le gaz ainsi liquéfié vient à se vaporiser, la quantité de chaleur qu'absorbe ce changement d'état est assez grande pour congeler l'eau dont le récipient qui contient le gaz est entouré.

Voici la description du premier appareil de ce genre imaginé par M. Carré :

Une chaudière cylindrique, remplie en partie d'une dissolution de gaz ammoniac, est placée sur un fourneau jusqu'à ce que la température de 130° soit atteinte, ce qu'on reconnaît à l'aide d'un thermomètre dont la tige dépasse le couvercle.

Le gaz ammoniac se dégage et se rend, par un tube abducteur, dans un réfrigérant ou vase en forme de tronc de cône renversé plongé dans une cuve d'eau froide. L'intérieur de ce réfrigérant sert à placer le vase cylindrique contenant l'eau qu'il s'agit de congeler. Or voici comment s'obtient ce résultat. Les vapeurs ammoniacales qui se dégagent incessamment de la chaudière sont refroidies par l'eau de la cuve, et, en outre, soumises à une pression croissante : elles se condensent dans le vase cylindro-conique; le gaz se liquéfie et reste enfermé dans des godets adaptés aux parois dans l'espace annulaire qui entoure le cylindre central, et dont l'objet principal est de multiplier les surfaces de contact entre le liquide et le congélateur. Cette première phase de l'opération dure de trois quarts d'heure à une heure; c'est celle que représente la figure 253. A ce moment, on sort la chaudière du fourneau et on la plonge dans la cuve d'eau froide, d'où le congélateur a été enlevé, et l'on place dans celui-ci le cylindre plein de l'eau à congeler. Cela fait, on introduit entre les deux surfaces concentriques de l'alcool qui assure leur contact, et l'on enveloppe le congélateur d'une couverture de feutre ou de laine bien sèche. Alors commence la seconde phase de l'opération, qui dure aussi environ une heure : l'eau de la chaudière redevient, par le refroidissement, apte à dissoudre le gaz ammoniac, qui reprend rapidement l'état gazeux. Cette évaporation nécessite une absorption de chaleur, qui se fait aux dépens du vase central et de l'eau qu'il contient. On peut bientôt en retirer un bloc de glace.

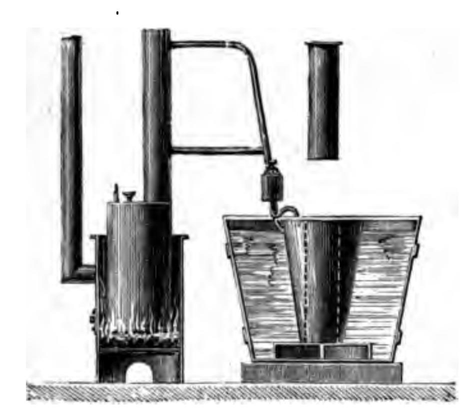


Fig. 253. — Appareil Carré pour la fabrication artificielle de la glace.

L'appareil que nous venons de décrire, qui est représenté dans la figure 253, est destiné à l'usage domestique, à cause

de la faible quantité de glace qu'il peut produire. C'est aussi le cas pour l'appareil imaginé par M. E. Carré, frère du précédent inventeur, et ayant pour principe le froid qu'une évaporation rapide détermine à la surface de l'acide sulfurique, en un mot reproduisant en grand la célèbre expérience de Leslie.

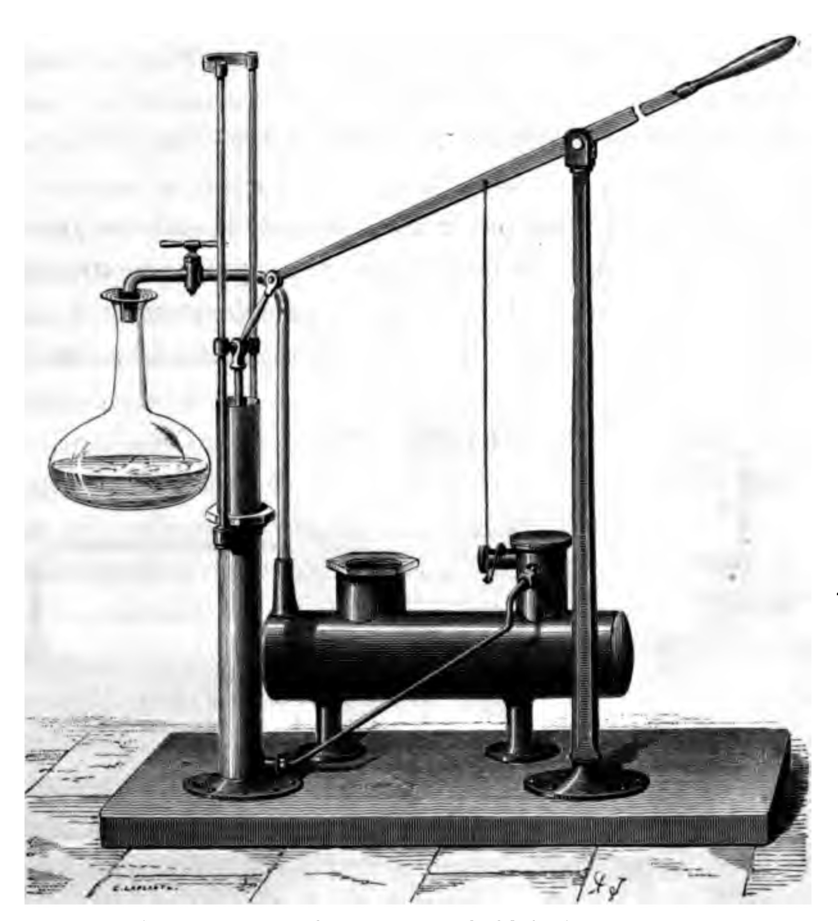


Fig. 254. — Appareil E. Carré pour la fabrication de la glace.

L'acide sulfurique est contenu dans un réservoir en plomb allié d'antimoine, que l'acide n'attaque pas à la température ordinaire. Un tuyau coudé part de ce réservoir, et c'est à son extrémité qu'on fixe le vase contenant l'eau à congeler; c'est ici une carafe maintenue par un bouchon en caoutchouc (fig. 254). Un autre tube fait communiquer le réservoir avec le pied d'une pompe pneumatique, qu'on peut manœuvrer à la main à l'aide

d'un levier. Le vide se fait à la fois au-dessus de l'acide et dans la carafe, dont l'eau entre alors en ébullition. Le froid que causent la vaporisation rapide de l'eau et l'absorption de sa vapeur par l'acide sulfurique est suffisant pour congeler l'eau de la carafe. En quelques minutes, on obtient ainsi aisément un kilogramme de glace.

§ 3. FABRICATION DE LA GLACE. — APPAREILS A FABRICATION CONTINUE.

Outre qu'il ne permet pas la fabrication de la glace en grand, l'appareil à ammoniaque de M. Carré a un autre inconvénient grave (qui d'ailleurs est la cause principale du premier) : c'est de fonctionner d'une manière intermittente. Mais le même in-

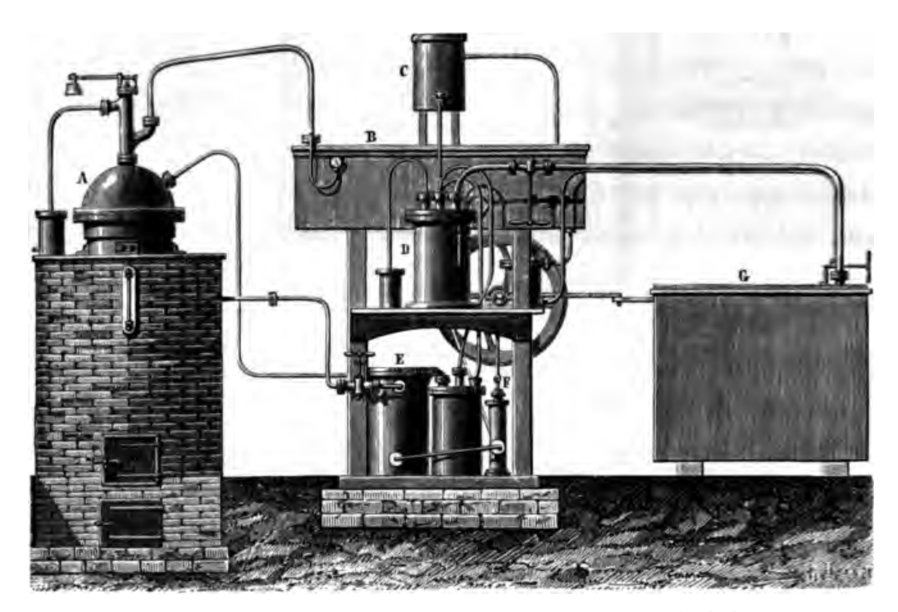


Fig. 255. — Grand appareil Carré pour la fabrication artificielle de la glace.

venteur ne tarda point à résoudre le problème de la continuité, en construisant le grand appareil dont la figure 255 va nous permettre de donner la description.

A est la chaudière où l'on chauffe la dissolution ammoniacale : c'est un cylindre vertical de $1^m,20$ de hauteur sur $0^m,40$

de diamètre ; sa capacité est de 150 litres, mais on ne la charge que de 80 à 90 litres de la dissolution concentrée d'ammoniaque. Chauffée à une température maximum de 130°, la tension des vapeurs mélangées d'eau et de gaz atteint 8 atmosphères. Le gaz qui s'en échappe se rend dans un récipient B plein d'eau froide, où il traverse une série de quatre serpentins plans et parallèles dans lesquels il se liquéfie par refroidissement ; C est un réservoir d'où coule constamment un jet d'eau froide destiné à renouveler l'eau du récipient. Le gaz liquéfié se rend de là dans un cylindre D d'une capacité de 4 à 5 litres, et qui est destiné au rôle de distributeur, grâce à un mécanisme intérieur qui permet de régler la dépense du liquide, c'est-à-dire son entrée dans le réfrigérant G. Comme il a jusqu'ici conservé sa pression de 8 atmosphères, c'est-à-dire un excès de 7 atmosphères sur la tension qui existe dans le vase G, on interpose un robinet qui permet de modérer l'effet de cet excès de pression. C'est dans le réfrigérant ou *congélateur* G, que se trouvent disposés les vases remplis de l'eau à congeler. Là le liquide ammoniacal, sous l'influence de l'excès de pression de 7 atmosphères, se précipite dans le vide relatif qui lui est offert, et l'évaporation rapide qui en est la conséquence détermine un froid assez intense pour congeler l'eau des vases qui s'y trouvent renfermés.

La première phase de l'opération se termine ainsi par la congélation, qui en est le but principal. La seconde phase, ayant pour objet la régénération de la solution ammoniacale de la chaudière, commence alors. Les vapeurs formées dans le réfrigérant en sortent par un large tube, et vont affluer dans un réservoir où l'eau appauvrie de la partie inférieure de la chaudière vient tomber en pluie, après s'être refroidie dans un serpentin. L'ammoniaque s'y condense par absorption et reconstitue une solution riche qui tombe au fond du réservoir. Il ne reste plus qu'à renvoyer cette solution dans la chaudière : c'est ce qu'on obtient à l'aide de la pompe aspirante et foulante F, qui aspire le liquide enrichi à mesure qu'il se forme, puis le

refoule dans le réservoir E et enfin de là, par un tube, jusqu'au sommet de la chaudière. Ainsi s'opère, d'une manière continue, la régénération de la dissolution ammoniacale, sans qu'il soit besoin d'en renouveler les éléments. On obtient de la sorte 15 à 18 kilogrammes de glace par kilogramme de houille brûlée. En vingt-quatre heures, une machine du type qu'on vient de décrire permet de fabriquer jusqu'à 3000 kilogrammes de glace, dont le prix de revient ne dépasse pas un centime le kilogramme.

On voyait à l'Exposition universelle de 1878 diverses machines à fabriquer la glace : les machines Sulzer, dans lesquelles les vapeurs ammoniacales, au lieu de se dissoudre dans l'eau, étaient liquéfiées par une pompe à compression; la machine Tellier, fondée sur le froid que détermine l'évaporation dans le vide de l'éther méthylique, et sur sa liquéfaction par la condensation : une pompe à double effet aspirante et foulante, mue par la vapeur, produit ces deux effets opposés dans les deux parties essentielles qui composent cette ingénieuse machine : le *frigorifère*, sorte de chaudière tubulaire contenant l'éther liquide, et le *condenseur*, capacité cylindrique renfermant un serpentin que refroidit un courant continu d'eau froide; la machine Tellier fournit 200 kilogrammes de glace à l'heure, au prix de revient de 2 centimes le kilogramme; les machines anglaises de l'*Atlas Company*, qui emploient l'éther au lieu de l'ammoniaque, et produisent 1000 kilogrammes en 24 heures; la machine Giffard, employant l'air comprimé et sa détente à la production du froid, et donnant 3000 kilogrammes de glace par jour, à 1^{c},5 le kilogramme; et enfin la machine de M. Raoul Pictet, fondée sur l'évaporation de l'acide sulfureux liquide, et que représente la figure 256. Ce dernier appareil se compose de trois parties principales : le condenseur, le réfrigérant et le système de pompes aspirantes et foulantes à l'aide desquelles on produit le vide qui détermine l'évaporation de l'acide sulfureux liquide, puis le retour des vapeurs à l'état liquide par leur condensation. La machine

Raoul Pictet donne 1000 kilogrammes de glace à l'heure. Les pompes sont actionnées par un moteur horizontal de la force de 50 chevaux-vapeur. Une dépense d'un kilogramme de houille donne 22 kilogrammes de glace, ce qui, tout compte fait, met à un demi-centime le prix de revient du kilogramme.

Pour terminer l'énumération de ces appareils de production industrielle du froid, citons encore, bien qu'il soit utilisé plutôt pour les recherches scientifiques, le *frigorifère* Vincent, dont

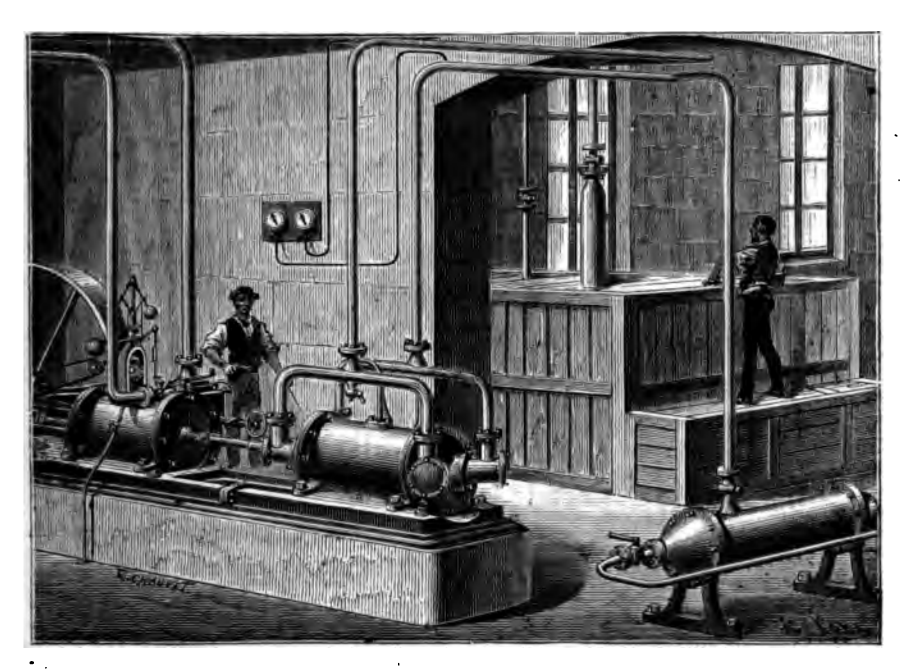


Fig. 256. — Machine à fabriquer la glace de M. Raoul Pictet.

la figure 257 va nous aider à comprendre le fonctionnement. L'inventeur, M. C. Vincent, a songé à utiliser les propriétés du chlorure de méthyle, qui entre en ébullition à la basse température de 23 degrés au-dessous de zéro. Voici, d'après M. Schützenberger[1], la description et l'emploi de l'appareil en question :

« Le frigorifère Vincent se compose d'un vase cylindrique en cuivre AM, à double paroi, entre les deux enveloppes A, A

1. *Traité de Chimie générale*, t. I.

duquel on peut introduire du chlorure de méthyle, à l'aide d'un robinet BC, formé d'une tige d'acier filetée terminée par un cône s'appliquant sur un siège en bronze, et que l'on peut facilement manœuvrer à l'aide d'une poignée D. Une vis métallique S, qui s'applique sur une rondelle en plomb, ferme un second orifice mettant l'espace annulaire en communication avec l'air ambiant; au moment de remplir l'appareil, on desserre légèrement cette vis pour laisser échapper l'air.

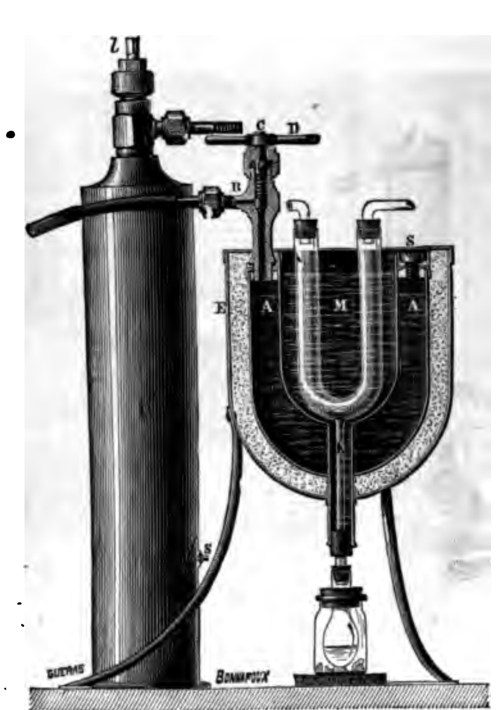
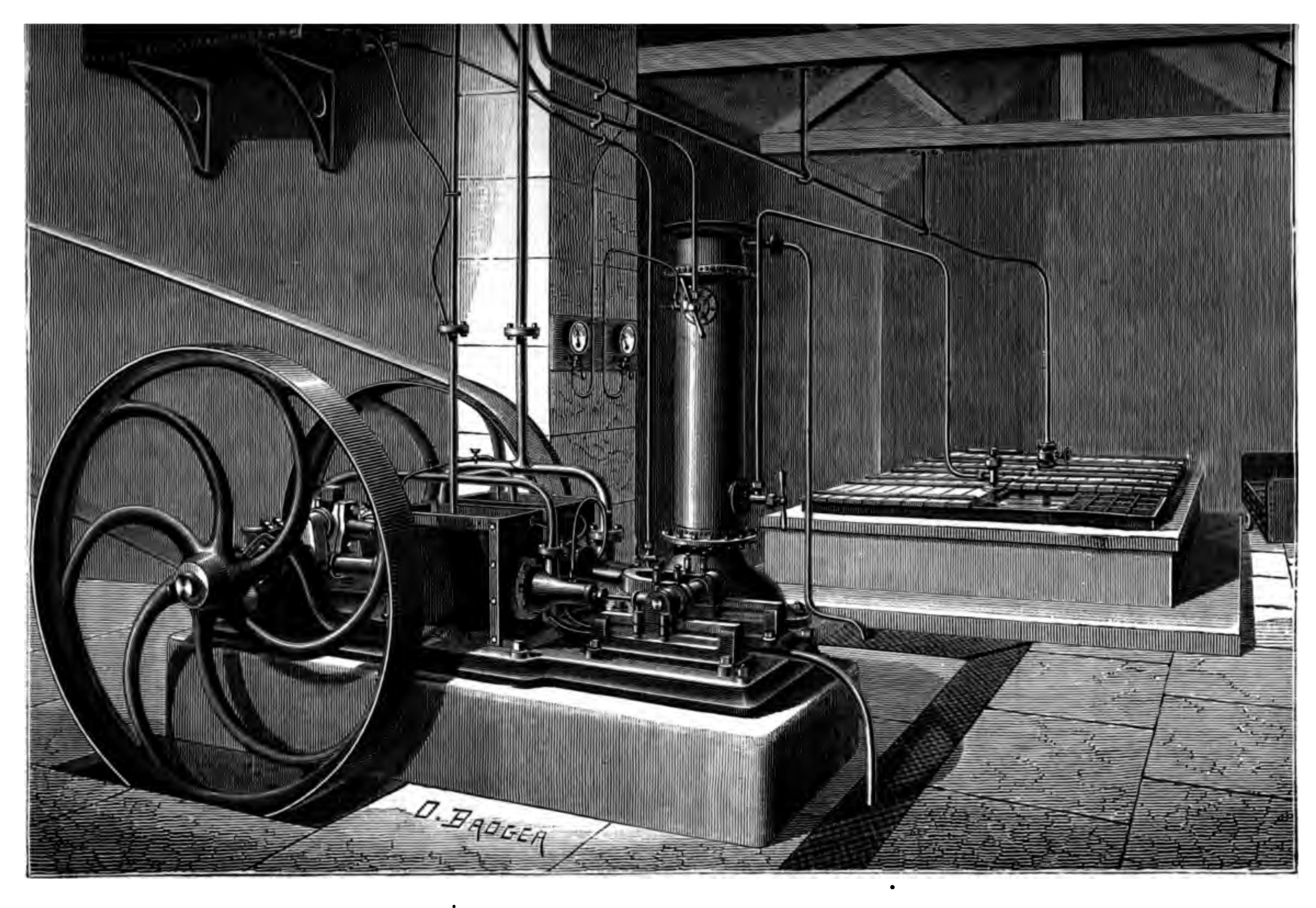


Fig. 257. — Frigorifère C. Vincent.

« Le chlorure de méthyle se trouve en provision dans un cylindre en cuivre P servant à son transport, et portant un robinet à vis *b*, semblable à celui du frigorifère; on fait facilement passer le liquide dans ce dernier appareil au moyen d'un tube en caoutchouc renforcé par des toiles. On peut introduire ainsi 2k,500 environ de chlorure de méthyle dans le frigorifère. Le vase central M reçoit un liquide incongelable, tel que l'alcool, pour former un bain dans lequel on peut plonger les corps à refroidir, et notamment le tube K, à travers lequel on fait circuler les gaz destinés à la liquéfaction. Le cylindre est entouré d'une matière peu conductrice de la chaleur, telle que de la râpure de liège, maintenue par une enveloppe E.

« Pour abaisser la température du bain à —23°, il suffit d'ouvrir le robinet; veut-on au contraire l'amener à —50°, on relie le robinet du frigorifère à une bonne machine pneuma-



GRANDE MACHINE FRIGORIFIQUE DE M. CAMILLE VINCENT.

Production du froid par le chlorure de méthyle.

tique. Un appareil double, composé de deux frigorifères et d'une pompe aspirante et foulante mue par l'intermédiaire d'un volant, permet d'éviter la perte du chlorure, et de le condenser à nouveau après évaporation. »

Avec le frigorifère simple, on peut faire un grand nombre d'expériences de laboratoire, par exemple la liquéfaction de gaz ou la congélation de liquides, expériences qui exigeaient jusqu'alors l'emploi coûteux soit du protoxyde d'azote liquide, soit de l'acide carbonique solide. L'appareil à pompe aspirante et foulante qui permet de faire successivement le vide dans le frigorifère, pour obtenir une température plus basse, et ensuite de récupérer le chlorure à l'état liquide par la compression, peut servir aussi bien aux usages domestiques qu'à ceux du laboratoire : on obtient ainsi très rapidement de la glace.

M. Vincent a fait aussi construire de grandes machines frigorifiques dont les applications industrielles ne peuvent manquer de recevoir des développements importants.

L'une de ces machines se compose de trois parties principales : le *frigorifère*, où se fait la vaporisation du chlorure de méthyle liquide, et où, comme son nom l'indique, se produit le froid ; le *liquéfacteur*, appareil où la vapeur comprimée repasse à l'état liquide ; et la *pompe aspirante et foulante*, dont l'action a pour double objet de recueillir la vapeur au sortir du frigorifère et de la refouler comprimée dans le liquéfacteur. La planche VI montre comment sont disposés ces divers organes de la machine frigorifique Vincent. A droite et au fond de l'atelier où elle se trouve installée, on voit une grande capacité rectangulaire dont la face supérieure est recouverte de caissons ou alvéoles renfermant l'eau à congeler. C'est le *frigorifère*. Sous les alvéoles est une sorte de chaudière tubulaire horizontale renfermant le chlorure de méthyle liquide, et dans les tubes eux-mêmes une dissolution incongelable de chlorure de calcium. La vaporisation du chlorure de méthyle détermine le refroidissement de cette dissolution, qui, chassée par l'action

d'une hélice autour des alvéoles, congèle l'eau qu'elles contiennent.

La pompe à double effet située en avant et à droite du dessin aspire par l'un de ses cylindres la vapeur de méthyle qu'un long tuyau amène du frigorifère, la comprime à moitié, puis l'envoie dans le second cylindre, où la compression s'achève et qui la lance dans le liquéfacteur. Ce dernier est un grand cylindre vertical, installé entre le frigorifère et les pompes; il forme intérieurement un corps tubulaire où arrive la vapeur comprimée et où elle se liquéfie sous l'influence du refroidissement qu'elle subit au contact des tubes. Ceux-ci sont en effet constamment parcourus par un courant d'eau froide. Du liquéfacteur, le chlorure de méthyle redevenu liquide retourne au frigorifère par le tuyau à robinet qu'on voit en avant du cylindre, près de sa base. La continuité de l'opération se trouve ainsi assurée.

En marche normale, la pression dans le liquéfacteur varie de 3 à 4 atmosphères, selon la température de l'eau employée à la réfrigération. Le degré de vide dans le frigorifère oscille entre 0 et 0,5 atmosphère, selon le degré de froid qu'on veut obtenir. Une machine installée comme celle qu'on vient de décrire peut produire entre 100 et 500 kilogrammes de glace à l'heure.

L'emploi du chlorure de méthyle a d'ailleurs d'autres avantages que sa grande puissance frigorifique : le liquide n'altère pas les métaux; sa vapeur, d'une odeur douce, peut être respirée sans inconvénient par les ouvriers, en cas de réparation. Enfin, c'est un produit de fabrication industrielle courante.

§ 4. APPLICATIONS DIVERSES DES MACHINES A GLACE ET APPAREILS FRIGORIFIQUES.

Après avoir décrit, avec les détails nécessaires, les procédés employés pour la production des basses températures et les appareils qui servent à la fabrication de la

hors de propos, croyons-nous, d'indiquer quelques-unes des applications les plus importantes que les inventeurs avaient en vue en imaginant procédés ou machines.

La plupart des substances organiques, animales ou végétales, lorsqu'elles ne font plus partie d'un être vivant, subissent promptement, aux températures ordinaires et au contact de l'air, une fermentation qui ne tarde point à prendre les caractères d'une décomposition putride, d'autant plus rapide que la température est plus élevée. La fermentation n'est plus possible, ou s'arrête, si le froid est suffisamment intense : la température de 0° remplit cette condition.

On devait songer à utiliser les froids artificiels, l'emploi de la glace par exemple, pour la conservation des substances alimentaires, œufs, viande, gibier, poisson, etc. On a commencé par construire, pour cet objet, de petites glacières domestiques très bien appropriées et fort économiques. Nous citerons celles que M. Pasteur avait adoptées, au laboratoire de l'École normale, pour retarder l'éclosion de certaines graines de ver à soie, pour conserver des ferments, etc. C'était tout simplement une fontaine de cuisine en grès, disposée au centre d'un tonneau et entourée d'un corps mauvais conducteur, comme le coton cardé. Une boîte en fer-blanc, percée de trous, contenant les objets à refroidir, était placée au centre de la fontaine, dont on la séparait par des fragments de glace. Un kilogramme de glace suffisait à maintenir une température de 0° pendant 3 ou 4 jours; on recueillait l'eau de fusion par le robinet de la fontaine.

En installant cette glacière fort simple à la cave, chacun peut conserver chez soi, d'une manière très peu coûteuse, toute sorte d'objets alimentaires qui s'altèreraient promptement pendant les chaleurs de l'été.

M. Ch. Tellier a imaginé, dans le même but, divers appareils, auxquels il donne une forme quelconque, celle d'un buffet par exemple ; pour la servation de la viande chez les

de citerne, creusée dans le

sol. Un cylindre à double enveloppe tronconique servait à recevoir les viandes suspendues à une sorte d'étagère ou de cage métallique, qu'on manœuvrait par une poulie. La glace remplissait l'intervalle des deux enveloppes du cylindre, qui était protégé lui-même par des couches de matières isolantes tassées entre le cylindre et les parois de la citerne. On pouvait faire écouler l'eau de fusion à l'aide d'une petite pompe à main, qui la puisait latéralement au fond de la citerne.

Supposons ces procédés généralisés et appliqués en grand à tout un navire, et nous aurons la disposition adoptée par le même inventeur pour le transport, sur grande échelle, de la viande d'Amérique en Europe. Le *Frigorifique*, navire de 900 tonneaux, avait été aménagé dans ce but; il fit un premier voyage à la Plata en août 1876, et revint en France au mois de juillet 1877, chargé de viandes en bon état de conservation. Le moyen employé pour maintenir les viandes en cet état pendant toute la traversée consistait à entretenir dans les magasins où elles étaient suspendues un courant constant d'air sec et froid. Les appareils producteurs du froid étaient ceux dont il a été question dans le paragraphe précédent, basés sur la vaporisation de l'éther méthylique. Ces machines, placées à l'arrière du navire, refroidissaient l'air amené du dehors dans une chambre, dite *chambre de froid*, dont les parois se recouvraient de toute l'humidité contenue dans cet air, sous forme de givre déposé à leur surface. De là, l'air ainsi refroidi à environ —2° était chassé sous les parquets des magasins ou *chambres à viande*, qu'une double enveloppe de tôle et de planches protégeait contre la chaleur extérieure, grâce à une couche de matières interposée (paille coupée et feutre). Une machine à vapeur actionnait les pompes qui produisaient la ventilation constante des chambres et le renouvellement continu de l'air à basse température dont elles avaient besoin [1].

1. Voici, d'après un médecin principal de la marine, M. Delpeuch, ce que devient la viande soumise à ces conditions : « Elle durcit, dit-il, et se dessèche à la surface, en consistance d'aponévrose, ou pour mieux dire de corne, et, sous ce glacis de trois millimètres

Aux environs de New-York existe un établissement où l'on conserve les poissons par le froid. Une salle de refroidissement, divisée par des cloisons en plusieurs compartiments, forme tout le premier étage de l'édifice. Les murs en sont doubles, ainsi que les plafonds qui la séparent du second étage, et les intervalles sont remplis d'un mélange de glace pilée et de sel. C'est dans ces chambres glacées que sont accrochés les poissons, après qu'ils ont été eux-mêmes refroidis et gelés dans des terrines, entre des lits de glace et de sel marin. Ils deviennent alors aussi durs, aussi rigides que des blocs de glace ou des barres de métal. « On les conserve dans cet état, dit une note de *La Nature* à laquelle nous empruntons ces détails, pendant un mois et même un an, et ils sont aussi frais au bout de ce temps que s'ils venaient d'être pêchés. Il suffit de les dégeler pour les rendre bons pour la cuisson. Le poisson est recueilli l'été, quand il est abondant, et conservé ordinairement jusqu'à l'hiver. » A Bone et à Alger des installations semblables ont été faites récemment.

Des procédés analogues permettent de conserver les fruits frais. C'est ainsi que les horticulteurs des environs de San Francisco, manquant de débouchés pour la vente de leurs fruits, ont fait construire des wagons munis d'appareils réfrigérants, capables de maintenir à l'état frais, pendant plus d'un mois, les fruits qu'ils expédient par la grande voie ferrée du Pacifique aux villes des États de l'Est. New-York, Boston, Philadelphie peuvent ainsi recevoir, dans un délai de dix jours, les fruits récoltés en Californie.

environ d'épaisseur, vous trouvez la chair vermeille et succulente, telle qu'elle se présente quelques heures après l'abatage : comme ténacité de la fibre, comme solidité et élasticité de la masse, pas de différence avec la viande fraîche. Enfin, il y a absence complète de toute odeur ; et ce n'est pas tout : cette chair, que la vie a quittée depuis plusieurs mois, n'éprouve pas, quand on la sort du milieu artificiel qui l'a conservée, la décomposition rapide qui attend, par exemple, celle qui a séjourné dans un bloc de glace : dépouillée de l'enduit protecteur que l'air froid lui a constitué, elle rentre dans les conditions normales de viande fraîche, et ne s'altère que dans les délais qui sont fixés à celle-ci par le climat et par la saison. » Malgré toutes les conditions apparentes de succès que présageait cet essai, l'entreprise du *Frigorifique* n'a pas eu de suite ; nous ignorons pourquoi.

A Saint-Pétersbourg, on fait geler les œufs pour les conserver frais; à New-York, ce sont les poissons; à San Francisco, il est probable qu'on ne fait pas geler les fruits; on se contente sans doute d'une température assez fraîche pour empêcher la fermentation.

Arrivons à d'autres applications industrielles du froid, plus importantes que les précédentes.

M. Raoul Pictet a utilisé les machines à glace à la rectification des alcools. Cette opération, qui a pour objet, comme on sait, de transformer les alcools *mauvais goût* en alcools *fins*, c'est-à-dire débarrassés des éthers et huiles empyreumatiques qui les rendent impropres à la consommation, est limitée dans les procédés ordinaires, à cause des températures relativement élevées auxquelles se fait la séparation des vapeurs des liquides de diverses natures composant les flegmes. La tension de ces vapeurs étant, à ces températures, considérable pour chacun d'eux, tous passent en proportions plus ou moins grandes dans le travail de rectification.

M. Pictet, s'appuyant sur ce principe « que c'est aux basses températures que la proportion d'alcool qui s'évapore d'un mélange est maximum », s'est proposé d'établir un dispositif réalisant les conditions suivantes : « 1° rendre variable à volonté la température du liquide bouillant; 2° rendre variable la pression des vapeurs qui agissent sur le liquide. Ainsi, dit-il, pour opérer la rectification de l'alcool, il suffit de provoquer son ébullition à de très basses températures et d'entretenir cette ébullition sans changer ces températures une fois obtenues. » Nous n'entrerons point dans la description des appareils et des opérations par lesquels M. Pictet a su réaliser ces conditions. Il nous suffira de dire que les organes qui servent à maintenir les basses températures en question sont des réfrigérants contenant de l'anhydride sulfureux liquide, et où, par l'action d'une pompe spéciale, l'évaporation de cet acide détermine un abaissement de température oscillant entre 25° et 50° au-dessous de zéro. Ce sont du reste des refrigérants en

tout semblables à ceux des machines à glace du même inventeur.

Une autre application industrielle des machines frigorifiques est celle qui a pour objet le refroidissement, après cuisson, du moût de bière. Lorsque cette cuisson est terminée, le moût passe de la chaudière, par des tuyaux en cuivre, dans de grands réservoirs peu profonds, que l'on nomme *refroidissoirs* et qui sont installés dans des greniers parfaitement aérés. Cette opération, qui permet aux diverses substances tenues en dissolution ou en suspension dans le moût de se déposer, peut être activée par l'emploi des divers réfrigérants dont nous avons donné la description. Ils sont également utilisés pour obtenir de la *bière de conserve*, qu'on obtenait auparavant en dirigeant le produit de la première fermentation dans de grandes cuves placées dans des caves entourées de glace ou *glacières*. On a établi au Caire, il y a quelques années, une brasserie où les machines Raoul Pictet sont employées à produire la glace nécessaire pour maintenir à une basse température les caves où la bière est fabriquée.

Parmi les applications des machines frigorifiques qui n'ont point été réalisées encore, croyons-nous, mais qui nous semblent devoir l'être incessamment, citons enfin la ventilation en été des grandes salles de réunion, des théâtres, et surtout des hôpitaux. Ce problème d'hygiène, d'une solution si difficile, puisque jusqu'à présent on n'a guère pu réussir qu'à substituer à l'air vicié de l'intérieur l'air pur mais toujours chaud de l'extérieur, trouverait là une solution. Il suffirait de faire passer préalablement l'air extérieur par des *chambres de froid*, où des machines à glace entretiendraient constamment une basse température. A quel prix se ferait cette substitution? C'est peut-être là qu'est le nœud ou la difficulté de la solution du problème.

CHAPITRE VII

LA MACHINE A VAPEUR

§ 1. LA VAPEUR FORCE MOTRICE.

De toutes les applications de la chaleur, et l'on peut bien ajouter de toutes celles que les autres agents physiques ont permis de réaliser, il n'en est aucune dont l'importance puisse être comparée à l'emploi de la vapeur comme force motrice. Deux siècles à peine nous séparent des premiers essais d'où la machine à vapeur est sortie; il n'y a guère plus de cent ans qu'elle a commencé à prendre possession des usines, et déjà elle a révolutionné l'industrie dans le monde entier. Après avoir envahi les manufactures, puis la navigation et les voies ferrées, la voilà qui se répand dans les fermes et s'attaque aux travaux agricoles. Les conséquences économiques ou sociales de la substitution de ce puissant moteur aux forces des animaux et de l'homme se développent sous nos yeux avec une prodigieuse rapidité. On ne s'étonnera donc point que nous consacrions plusieurs chapitres à l'étude de la machine à vapeur sous ses formes variées.

Les anciens connaissaient la force élastique de la vapeur d'eau[1]. Sans avoir de notions nettes, précises, de ses propriétés physiques, ils avaient cherché à tirer parti de cette force.

1. Aristote, Sénèque attribuaient à la transformation subite de l'eau en vapeur les effets des tremblements de terre. Cette transformation se fait, d'après eux, à l'intérieur du globe, sous l'influence de la chaleur souterraine. Or, comme le remarque Arago, « les grands effets qu'ils veulent expliquer montrent bien de quelle énorme puissance mécanique la vapeur leur semblait douée. »

C'est ainsi que Héron d'Alexandrie inventa la machine à laquelle on a donné le nom d'*éolipyle*, et divers appareils où l'action de l'air comprimé ou dilaté était en jeu. On va voir, en effet, que le mouvement de l'éolipyle avait bien pour cause la force expansive de la vapeur, mais agissant d'une tout autre façon que dans les machines à vapeur modernes.

C'était une marmite ou chaudière (fig. 258) en partie pleine d'eau, placée sur un foyer et fermée par un couvercle. Sur celui-ci, un tube creux et recourbé, muni d'un robinet, allait soutenir, en la pénétrant, une sphère creuse métallique, qu'un autre montant égal soutenait extérieurement à l'extrémité du même diamètre. La sphère était donc mobile autour de ce diamètre ou axe. Deux autres tubes creux et recourbés partaient de la surface de la sphère aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire à l'axe. Cela posé, on va comprendre l'action motrice de la vapeur dans ce petit appareil. On ouvre le robinet; la vapeur monte de la chaudière dans le tube creux et emplit la sphère métallique. Si celle-ci n'était percée d'aucune ouverture, elle resterait immobile; mais la vapeur, qui tend à presser la surface intérieure de la sphère avec la même force en tous ses points, trouvant deux issues, s'échappe avec bruit en se condensant dans l'air; la réaction, qui lui aurait fait équilibre au cas de la fermeture complète, s'exerce donc en sens contraire, et la sphère tourne avec plus ou moins de rapidité dans un sens opposé à celui de la sortie de la vapeur.

L'éolipyle (nom qui signifie *porte d'Eole* ou *porte de l'air*) est, comme on voit, une machine où la force élastique de la vapeur agit par réaction. Ce n'a jamais été d'ailleurs qu'un jeu de physique amusante, bien qu'il ait fixé l'attention des savants et des expérimentateurs des siècles qui ont précédé Papin, et qu'on l'ait décrit en proposant de l'utiliser pour faire marcher des tournebroches.

L'appareil décrit par Salomon de Caus dans son opuscule *Les raisons des forces mouvantes* (1615) est un exemple d'une application plus directe de la force expansive de la vapeur. De

l'eau est introduite par le robinet D (fig. 259) dans la sphère creuse A, qu'on place sur le feu après avoir fermé le robinet d'introduction. Un tube BC passe par une autre ouverture B et descend dans l'eau sans toucher le fond. Quand la vapeur s'est formée en assez grande quantité et que sa tension est assez forte, on ouvre le robinet B, et l'eau, pressée à sa surface intérieure par la force élastique de la vapeur, est projetée au dehors par le tube. Quelques années après Salomon de Caus, le marquis de Worcester construisit une machine à peu près semblable qui fut employée à élever l'eau à Vauxhall, près de Londres.



Fig. 258. — Éolipyle de Héron d'Alexandrie.

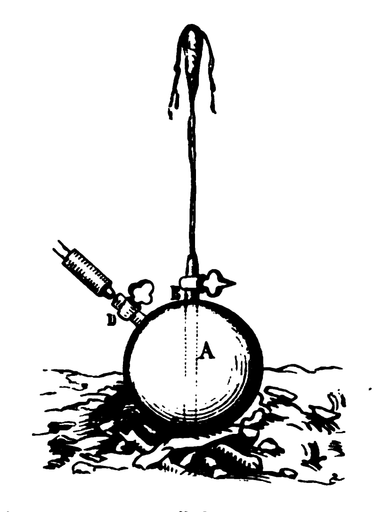


Fig. 259. — Appareil de Salomon de Caus.

Le récit complet et détaillé de toutes ces tentatives, de ces ébauches mécaniques où l'on cherchait à utiliser diverses forces naturelles, celle de l'air dilaté ou de l'air comprimé et celle de la vapeur, a un intérêt qui n'est point douteux pour l'histoire des progrès des applications de la science humaine[1]. Mais tout cela ne devient sérieusement instructif qu'à l'époque où la physique, sortant de la phase des explications subtiles et infécondes, est entrée dans la voie de l'expérience sous l'impulsion des Galilée,

1. Nous renverrons le lecteur désireux de connaître les phases de cette histoire, soit à la *Notice* que François Arago a publiée en 1837 sur l'*Histoire de la machine à vapeur*, soit à l'ouvrage tout récent qu'un savant américain, M. R. Thurston, a consacré au même sujet.

des Boyle, des Huygens. La machine à vapeur ne pouvait naître, ne pouvait recevoir les perfectionnements qui en firent un véritable moteur industriel, que dans le siècle qui avait vu découvrir les propriétés de l'air, la machine pneumatique, le baromètre et le thermomètre : Papin et Watt sont les enfants de Torricelli et de Galilée. La machine à vapeur est la fille de ces deux inventions si simples et si fécondes : celle du *baromètre*, qui démontre et mesure la pression de l'atmosphère, qui compare à cette pression les forces élastiques des gaz et des vapeurs; celle du *thermomètre*, qui mesure les degrés de la chaleur. Le moyen de faire le vide soit dans la chambre barométrique, soit dans un récipient dont l'air est extrait par une pompe, invention si précieuse d'Otto de Guéricke, venait aussi d'être trouvé, quand Denis Papin, notre illustre compatriote, a jeté les fondements de la plus grande révolution industrielle qu'ait vue le monde.

Mais, pour bien préciser par quelle suite d'idées ont dû passer les grands esprits qui ont eu la gloire d'attacher leurs noms à la découverte de la machine à vapeur, il est indispensable d'entrer dans quelques développements.

§ 2. PAPIN; PREMIERS ESSAIS; SAVERY. — ORGANES ESSENTIELS DE LA MACHINE A VAPEUR MODERNE.

Dès 1680, Huygens avait songé à utiliser la force expansive de la poudre à canon. Voici comment. Dans un cylindre muni d'un piston mobile, il faisait détoner une certaine quantité de poudre, et la violente expansion des gaz chassait l'air contenu dans le cylindre par deux ouvertures disposées de manière à se refermer aussitôt. Le vide se faisait donc, au moins partiellement, de sorte que la pression de l'atmosphère s'exerçait sur la face supérieure du piston avec une énergie proportionnelle à sa surface et en rapport avec le degré de vide obtenu.

Un modeste médecin français, Denis Papin, que la révoca-

tion de l'édit de Nantes força de s'exiler, chercha d'abord[1] à perfectionner la machine proposée par Huygens, machine qui, du reste, dans la pensée de son auteur, « pouvait servir, non seulement à élever toutes sortes de grands poids et des eaux pour les fontaines, mais aussi à jeter des boulets et des flèches avec beaucoup de force, suivant la manière des balistes des anciens. » Mais bientôt, deux années plus tard, en 1690, il songea à substituer à la poudre à canon un autre agent, propre comme elle à faire le vide sous le piston et à laisser ainsi à la pression atmosphérique toute sa prépondérance.

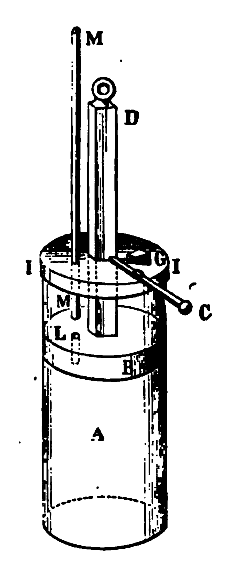


Fig. 260. — Première machine à vapeur de Papin.

Cet agent, c'était la vapeur d'eau, avec laquelle Papin était déjà familier, puisque dès 1681 il avait inventé sa marmite célèbre, son *nouveau digesteur*, dont il a été question plus haut. Voici en quelques lignes la description de la première machine à vapeur telle que Papin l'avait conçue, et l'explication, très simple à concevoir, de ses effets.

B est un piston muni d'une tige verticale D et mobile dans un cylindre de même diamètre, à l'intérieur duquel on a introduit de l'eau à une faible hauteur. Dans le piston, on a pratiqué un trou L qu'une tige M peut fermer à volonté.

Supposons le piston enfoncé dans le cylindre jusqu'au contact de l'eau dont une partie a pu sortir par l'ouverture, celle-ci étant alors fermée à l'aide de la tige. Plaçons alors le cylindre, dont les parois sont métalliques, sur un foyer ardent : l'eau est bientôt réduite en vapeur, et celle-ci, par sa force élastique, surmonte le poids du piston et la pression de l'atmosphère; elle fait remonter le piston au haut du cylindre. Dès que le piston arrive au sommet de sa course, une verge mince C, mo-

1. C'est à l'année 1688 que remonte cette première tentative.

bile autour d'un de ses points, et jusque-là maintenue au contact de la tige du piston par un ressort G, pénètre dans une fente de cette tige, lorsque le mouvement d'ascension amène la fente en face de la verge. En ce moment donc, le mouvement s'arrête. Otons alors le foyer de dessous le cylindre; bientôt ses parois et la vapeur d'eau qu'elles renferment se refroidissent : la vapeur se condense et le vide reste au-dessous du cylindre, de sorte que, si l'on vient à faire sortir la verge de la fente où elle maintient la tige et le piston, le piston, pressé par le poids de l'atmosphère, sera poussé de haut en bas, et l'on pourra profiter de cette pression considérable pour lui faire soulever des fardeaux.

En un mot, la disposition de la machine de Papin est un peu différente de celle où Huygens faisait le vide par la poudre à canon; mais l'effet produit est le même. Seulement, c'est la vapeur d'eau qui agit, c'est sa force élastique qui fait monter le piston; c'est sa condensation par le froid qui fait le vide.

Retenons ici deux faits. Papin, dans cette première machine à vapeur, emploie d'abord le fluide élastique à une pression un peu supérieure à la pression atmosphérique : elle lui sert alors comme moteur pour soulever le piston. Puis il la condense par le refroidissement, de manière à faire le vide, et c'est la pression de l'atmosphère qui devient le moteur véritable, celui qui accomplit le travail utile en vue duquel la machine est construite. Plus tard il modifia sa conception première, mais peu heureusement, il faut le dire; et c'est la machine que nous venons de décrire qui constitue son plus grand titre de gloire, son droit incontestable à être considéré comme l'inventeur de la machine à vapeur.

Savery, qui vint après (1698), eut l'heureuse idée de produire la vapeur dans un vase séparé, de la condenser dans un autre; mais sa machine est, sous un autre rapport, une rétrogradation relativement à celle de Papin. En effet, la force élastique de la vapeur y est employée à refouler l'eau directement, tandis que nous venons de voir Papin se servir de cette force pour pro-

duire le mouvement d'un piston, mouvement qu'il suffira de transformer par des procédés purement mécaniques, pour faire de la machine à vapeur un moteur universel.

Mais, avant de continuer cet aperçu historique, que nous complèterons plus loin en décrivant la machine de Savery, voyons sommairement quel est le principe de la machine à vapeur moderne, et de quels organes essentiels elle est composée. D'abord et avant tout, il faut songer à développer la force, c'est-à-dire à produire et à recueillir une certaine quantité de vapeur d'eau. C'est à quoi l'on parvient en faisant chauffer sur un foyer une marmite ou chaudière remplie d'eau, du moins en partie. C'est le *générateur de vapeur*, l'une des trois parties essentielles ou constitutives de la machine.

De la chaudière, la vapeur passe dans une capacité de forme cylindrique partagée en deux par un piston mobile : c'est là que, par des dispositions spéciales, la vapeur agit, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre du piston, de manière à lui imprimer un mouvement alternatif ou de va-et-vient, mouvement qui est l'objet direct de la machine.

Le cylindre, le piston et les pièces accessoires qui distribuent la vapeur dans les deux chambres du cylindre, constituent la partie de la machine formant le *mécanisme moteur :* c'est la machine proprement dite, dont le jeu ne serait d'ailleurs pas bien compris, si je n'entrais encore dans quelques détails.

Considérons la figure 261, qui représente la machine à vapeur réduite à ses organes essentiels. C'est le générateur où l'eau se transforme en vapeur, en remplissant l'espace situé au-dessus de l'eau dans la chaudière, ainsi que le tuyau VV. Ce tuyau conduit le gaz élastique dans une capacité *b* contiguë au cylindre, et qu'on nomme la *boîte à vapeur*. Deux robinets R, R, adaptés à la paroi latérale, permettent à la vapeur, quand l'un ou l'autre est ouvert, d'arriver soit à la chambre supérieure B, soit à la chambre inférieure A du cylindre. Supposons d'abord le robinet supérieur ouvert et l'autre fermé. La vapeur passe en B, où elle presse le piston et tend à lui impri-

mer un mouvement descendant dans le cylindre. Qu'on ferme alors le robinet supérieur et qu'on ouvre l'autre, la vapeur passera en A, où elle agira sur le piston par sa face inférieure et tendra à le faire remonter.

Mais là se présente une difficulté : si la vapeur se trouvait à la fois en A et en B, comme sa force élastique est la même des deux côtés, son action sur la face inférieure du piston compenserait exactement son action sur la face supérieure, et le mouvement ne serait pas produit.

Il fallait donc trouver le moyen d'annuler sa force élastique dès qu'elle a pu exercer son action, et cela alternativement dans les deux chambres du cylindre. On y parvient en ouvrant successivement les robinets R′, R′ : chacun d'eux est adapté dans une ouverture par où la vapeur est mise en communication avec un espace vide d'air, qui contient de l'eau froide, et dont les parois sont elles-mêmes à une basse température. Dès que la vapeur pénètre dans cet espace, qu'on nomme le *condenseur*, elle se précipite à l'état liquide presque tout entière, et ce qui en reste n'a plus qu'une tension très faible, de beaucoup inférieure à la tension que possède la vapeur, soit dans la chaudière, soit dans le cylindre. Cette disposition est nécessaire dans les machines où la vapeur n'agit qu'avec une tension peu supérieure à la pression atmosphérique. Quand la vapeur a une tension égale à plusieurs atmosphères, le condenseur n'est plus indispensable : la condensation se fait à l'air libre.

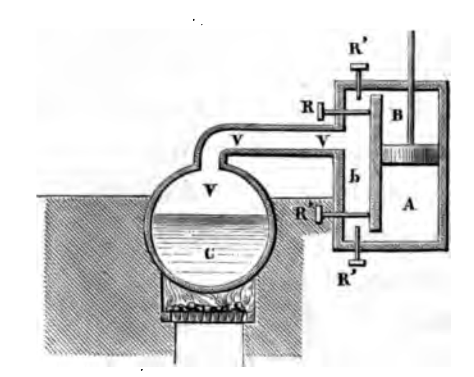


Fig. 261. — Organes essentiels de la machine à vapeur.

Il est aisé alors de voir que, dans chacun de ces cas, la difficulté signalée se trouve vaincue; car imaginons le robinet supérieur R ouvert et l'inférieur fermé, tandis que le robinet

supérieur R′ est fermé et l'inférieur ouvert. La vapeur afflue en B, où elle exerce son action; celle que renfermait A se condense, et le vide se fait sous le piston, qui descend jusqu'au bas du cylindre. A ce moment, le jeu des robinets est renversé. La vapeur de la chaudière pénètre en A; celle de B se condense, et le piston est soulevé de bas en haut. Ainsi indéfiniment.

Voilà donc, dans son principe et ses dispositions fondamentales, la machine à vapeur moderne. Un mouvement rectiligne alternatif, déterminé par l'action de la force élastique de la vapeur dans un cylindre fermé de toutes parts, action qui cesse brusquement dès que la même vapeur s'est condensée par le refroidissement. Le mouvement obtenu, il ne s'agit plus que de lui faire produire un effet utile, en le transformant de mille manières, selon les besoins de l'industrie, selon l'espèce d'application qu'on en veut faire, en lui demandant, par exemple, tantôt de la puissance, tantôt de la vitesse, tantôt la vitesse et la puissance réunies. Le mécanisme qui opère cette transformation, *le mécanisme de transmission*, est le troisième élément que nous aurons à étudier pour compléter la description de la machine à vapeur, qui comprend donc :

Le *générateur* ou la *chaudière;*

Le *récepteur* ou *mécanisme moteur* et le *mécanisme de distribution;*

Le *mécanisme de transmission.*

Études en détail chacune de ces parties de la machine.

§ 3. LA CHAUDIÈRE OU LE GÉNÉRATEUR.

Les formes de chaudière adoptées aujourd'hui sont si nombreuses, que nous ne chercherons pas même à les énumérer toutes : il sera bien suffisant, pour le but que nous nous proposons, de faire comprendre en quoi se ressemblent et en quoi diffèrent les systèmes principaux. Mais, avant d'en arriver là, faut-il encore connaître d'une façon précise un exemplaire de

l'un d'entre eux. Prenons la chaudière la plus généralement adoptée dans les usines où l'on emploie des machines fixes, c'est-à-dire des machines construites, installées à demeure, là même où elles fonctionnent. La figure 262 en donne l'aspect extérieur. Voyons quelles en sont les dispositions intérieures.

A la partie supérieure du bâti de maçonnerie repose un grand vase de tôle, de forme cylindrique dans toute sa longueur, terminé aux deux bouts par deux fonds hémisphériques. C'est



Fig. 262. — Chaudière à deux bouilleurs; vue extérieure.

le corps de la chaudière, la capacité qui contient la plus grande masse de l'eau à vaporiser. Les figures 263 et 264 la montrent en C, soit en coupe longitudinale, soit en coupe transversale.

Au-dessous du corps principal, on voit deux, quelquefois trois longs tubes également cylindriques, B, B, qui communiquent avec lui par des tubulures nommées *évents* ou *culottes*.

Ces *bouilleurs*, entièrement remplis d'eau, sont directement placés au-dessus du foyer, dont les flammes lèchent d'abord leur surface extérieure, et c'est évidemment dans leur sein que

l'ébullition a lieu tout d'abord ou que se forment les premières bulles de vapeur. Leur nom de bouilleurs est donc bien justifié.

Les deux figures ci-jointes indiquent avec assez de clarté les positions et les dimensions du foyer, de la grille, du cendrier, pour que je n'aie pas besoin d'en parler autrement. Quant à la cheminée, on la voit à sa base, en U, et l'on peut suivre la fumée et les gaz de la combustion, depuis leur origine, au-dessus du foyer, jusqu'à cette base, à travers les conduits ou *carneaux c, c*, qui se trouvent ménagés entre les bouilleurs, le corps principal de la chaudière et la maçonnerie qui les enveloppe. Il faut remarquer la disposition de ces carneaux : celui qui est au-dessous des bouilleurs force la flamme et les gaz chauds à marcher jusqu'au fond du fourneau et à échauffer directement d'abord les bouilleurs eux-mêmes. Arrivés là, les gaz montent à l'un des deux carneaux latéraux supérieurs ; ils cèdent encore une partie de la chaleur qu'ils ont conservée à la paroi de la chaudière avec laquelle ils sont en contact. Enfin, un troisième trajet les fait passer dans l'autre carneau latéral pour s'échapper dans la cheminée.

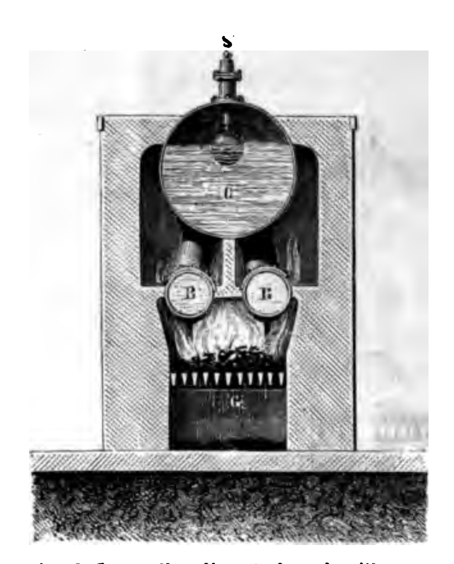


Fig. 265. — Chaudière à deux bouilleurs ; coupe transversale.

Le but qu'on se propose d'atteindre de la sorte est aisé à comprendre. Il s'agit d'utiliser, autant que possible, la chaleur qui émane du foyer, soit par le contact et l'action directe de la flamme, soit par celle des gaz de la combustion, lesquels, n'étant plus incandescents, n'en conservent pas moins une énorme quantité de chaleur. Or cette chaleur serait dépensée en pure perte, si, en sortant du foyer, les gaz avaient la liberté de gagner immédiatement l'atmosphère.

C'est une préoccupation du même genre qui a fait imaginer les bouilleurs. Les anciennes et primitives chaudières étaient hémisphériques à leur partie inférieure ; elles ne présentaient qu'une faible surface à l'action du foyer, eu égard à la masse de l'eau qu'il fallait vaporiser : elles n'avaient qu'une faible surface de chauffe. Augmenter la surface de chauffe des chaudières a été l'un des premiers progrès auxquels les construc-

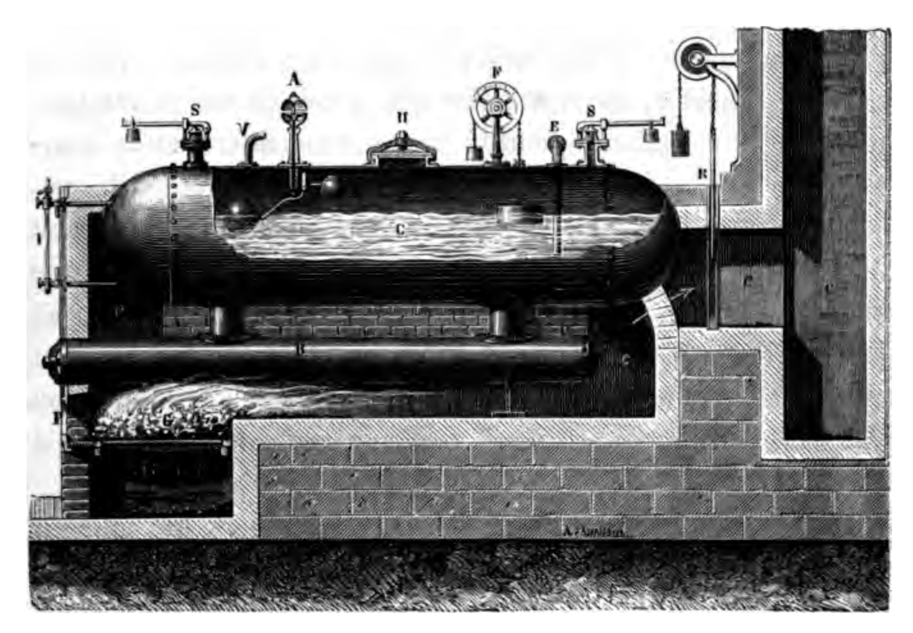


Fig. 264. — Chaudière à deux bouilleurs; coupe longitudinale : A, flotteur et sifflet d'alarme; B, bouilleur; C, corps de la chaudière; E, tuyau d'alimentation; F, flotteur indicateur de niveau, à cadran; H, trou d'homme pour le nettoyage; S, S, soupapes de sûreté; R, registre de tirage; U, cheminée; V, tuyau de prise de vapeur; c, c, carneaux; I, indicateur de niveau; G, foyer; P, porte du foyer.

teurs de machines (Watt le premier) ont dû songer. C'était tout simplement économiser le combustible, problème dont la solution, après bien des recherches heureuses, bien des progrès réalisés, est encore le *desideratum* des industries qui emploient la vapeur.

Il semble, d'après ce que nous venons de dire, que si les gaz de la combustion pouvaient, en arrivant à la base de la cheminée, être refroidis à une température égale à celle de l'air extérieur, par exemple, il y aurait tout bénéfice, puisque la

chaleur du foyer ou du combustible serait à peu de chose près entièrement utilisée. Mais cela n'est malheureusement pas possible ; ou plutôt, si l'on obtenait ce résultat, le tirage ou le renouvellement de l'air nécessaire à l'entretien de la combustion cesserait ; du moins serait-il considérablement ralenti. La houille brûlant mal, la chaleur du foyer n'étant plus suffisamment intense, les gaz d'hydrogène *protocarbonés* et *bicarbonés*, qui se dégagent en grande abondance du combustible, ne pourraient eux-mêmes brûler complètement. Ce sont eux qui forment la fumée épaisse et noire qu'on voit sortir si intense, toutes les fois qu'une quantité un peu considérable de combustible frais est introduite dans le foyer, qu'elle refroidit.

Les gaz chauds, en s'échappant dans la cheminée, servent donc à activer le tirage ; c'est une dépense, nécessaire dans une certaine limite, bien qu'elle n'ait pas pour résultat direct l'échauffement de l'eau, ni sa transformation en vapeur. C'est ainsi que souvent, dans la pratique industrielle, une innovation qui semble un progrès, quand on l'envisage sous une face, est un recul, considérée sous un autre point de vue.

C'est le moment de dire un mot de la cheminée, qui joue un si grand rôle dans le tirage. Plus la cheminée d'une chaudière est haute, la section restant la même ainsi que les autres conditions de la combustion, plus le tirage est actif. On a trouvé, par l'expérience, que la hauteur croît comme les carrés de l'intensité du tirage.

Si le tirage dépend de la hauteur de la cheminée, il dépend aussi du volume d'air dont celle-ci permet le passage, c'est-à-dire de la surface de sa section. D'après une règle donnée par Darcet, si la hauteur de la cheminée est 20 mètres, ou 30 mètres, la section devra avoir autant de fois 1 décimètre carré de surface qu'on doit brûler de fois par heure $4^{k},5$ ou 6 kilogrammes de houille. De sorte que la section d'une cheminée de 20 mètres de hauteur devra être égale à $\frac{180}{4,5}$ ou à 40 décimètres carrés, si le foyer doit consumer en une heure 180 kilogrammes de houille. Son diamètre intérieur, si

elle est ronde, devra être égal à 0m,71 ; si elle est carrée, le côté aura 0m,63.

Dans certaines circonstances, il faut modérer le tirage. On y parvient de la façon la plus simple, au moyen d'un *registre* ou valve mobile, qu'on voit en R dans la figure 264, et à l'aide duquel on diminue à volonté l'ouverture que la cheminée offre à la fumée et aux gaz de combustion.

Il n'y a pas jusqu'à la grille, à la forme et aux dimensions de ses barreaux, des interstices qu'ils laissent entre eux, qui ne soient des éléments de grande importance pour le bon fonctionnement d'un fourneau, pour l'activité du feu, et, par suite, pour la vaporisation de l'eau, dans son rapport avec la dépense de combustible. Tout cela doit être calculé, disposé, agencé à la fois d'après les données de la science et de l'expérience.

Pour en finir avec le fourneau de la machine à vapeur, nous dirons un mot, très court, sur une question qui a fait un certain bruit dans l'industrie. Nous voulons parler de la possibilité d'obtenir ce qu'on appelle un foyer *fumivore*. C'est une mauvaise expression que ce mot de fumivore, car jamais un foyer qui produit de la fumée ne s'en débarrasse, ne la détruit qu'en l'expulsant par la cheminée ou par la porte du foyer, ce qui, dans ce dernier cas, provient d'un tirage défectueux. La vraie question est celle-ci : installer un foyer dans lequel il ne se produise pas de fumée, ou, pour parler plus juste, dans lequel les gaz se dégageant du combustible soient brûlés le plus complètement possible. Quand le tirage ne fournit pas une quantité d'air assez abondante, les carbures d'hydrogène incomplètement brûlés s'échappent sous l'aspect d'une fumée noire et épaisse, très désagréable, très malpropre, mais dont les propriétaires de l'usine tiennent à se passer pour une raison plus positive, à savoir, parce que c'est le meilleur de la houille qui se perd ainsi sans avoir produit de chaleur.

Mais cet inconvénient grave du défaut de combustion peut se produire encore alors même qu'il n'y a pas de fumée. La houille, outre les carbures hydrogénés dont nous venons de

parler et qui se décomposent les premiers aussitôt que la combustion s'opère, renferme du carbone que l'oxygène transforme en oxyde de carbone, puis en acide carbonique, si le tirage fournit une quantité d'air suffisante. Si le tirage est mauvais, l'oxyde de carbone s'échappe sans avoir été brûlé complètement, et il peut y avoir perte considérable de chaleur, malgré l'absence de fumée. En un mot, un foyer dit *fumivore* n'est pas nécessairement économique.

Revenons à notre chaudière.

On a vu quelle est la forme d'ensemble du corps principal et des bouilleurs. Ceux-ci sont remplis entièrement par l'eau qui s'élève dans le corps de la chaudière jusqu'à une certaine hauteur. L'espace libre qui surmonte le niveau de l'eau est celui que remplit la vapeur avant d'aller exercer son action sur les organes de la machine : on le nomme pour cette raison *réservoir* ou *chambre de vapeur*.

La chambre de vapeur doit avoir, avec la capacité de la chaudière, un rapport de grandeur qu'on fait ordinairement égal à un tiers dans la pratique. La raison du grand espace donné au réservoir vient de la nécessité de sécher le plus possible la vapeur formée; celle-ci entraîne presque toujours avec elle des gouttelettes liquides dont il faut éviter l'introduction dans le cylindre : nous verrons bientôt pourquoi.

Quant à la proportion qu'on donne à la capacité totale de la chaudière, relativement à la quantité de vapeur qu'elle doit fournir en une heure pendant le fonctionnement normal, elle est basée sur l'intérêt qu'il y a à ne point faire varier trop vite la température : c'est ce qui arriverait si l'alimentation périodique de la chaudière (laquelle se fait le plus souvent avec de l'eau froide) introduisait à la fois une trop grande quantité de liquide.

La force prodigieuse que recèle la vapeur d'eau portée à une haute température, et dont les effets s'exercent tout d'abord sur les parois intérieures de la chaudière, exige de la part de celles-ci une puissance de résistance qu'on n'obtient point sans

certaines conditions de forme, d'épaisseur, de qualité des matériaux employés.

La meilleure forme, au point de vue de la résistance, est la forme cylindrique, qu'on termine aux deux bases par des fonds de forme sphérique. La matière adoptée généralement était, il y a quelques années, la tôle de fer de première qualité, bien laminée avec le plus grand soin et la plus grande solidité. Mais aujourd'hui la tendance générale est de substituer l'acier au fer, qui est moins résistant, sans être beaucoup plus économique. Dans les locomotives, la chaudière est en cuivre.

Il y a quelques années, des ordonnances officielles réglaient les épaisseurs des tôles d'après les pressions moyennes évaluées en atmosphères que chaque chaudière était appelée à supporter. Aujourd'hui, les prescriptions de ce genre sont abandonnées et remplacées par une épreuve officielle à laquelle chaque constructeur est tenu de soumettre ses appareils[1].

§ 4. LES APPAREILS DE SÛRETÉ : INDICATEURS DE NIVEAU, FLOTTEURS, MANOMÈTRES.

Nous avons supposé la chaudière convenablement remplie d'eau qui, chauffée à la température nécessaire, fournit dans le réservoir une certaine quantité de vapeur possédant une pression qui varie selon les machines.

Il est d'une importance capitale que le niveau de l'eau ne s'abaisse point trop dans la chaudière, ni qu'il s'y élève au delà d'une certaine limite : dans les deux cas, on risque une des plus fréquentes causes d'explosion des machines. De là

1. Néanmoins il est bon de connaître la règle en question, que les mécaniciens utilisent toujours, par mesure de prudence. La voici : L'épaisseur était évaluée à $0^m,003$, auxquels on ajoutait le produit de $1^{mm},8$ par le nombre d'atmosphères et par le diamètre de la chaudière mesuré en mètres et fractions de mètre. Appliquons cette règle à une chaudière de $1^m,20$ de diamètre, destinée à supporter une pression de 4 atmosphères et demie. L'épaisseur de la tôle sera $3^{mm} + 1^{mm},8 \times 1,20 \times 4,5$, c'est-à-dire $3^{mm} + 9^{mm},7$ ou en tout 12 millimètres 7 dixièmes.

les appareils connus sous le nom générique d'*indicateurs du niveau* et qui méritent bien celui d'*appareils de sûreté*. On en emploie de plusieurs sortes et même simultanément.

Ainsi, vous voyez toujours adapté aux parois extérieures de la chaudière, et bien en vue, un tube de verre de cristal I qui communique par ses deux bouts avec l'intérieur de la chaudière (fig. 264). L'eau pénètre dans ce tube et y atteint, en vertu de la loi d'équilibre des liquides dans les vases communicants, le même niveau que dans le générateur. Le verre du tube a besoin d'être bien propre et transparent; voilà pourquoi l'on y adapte un double système de robinets qui permettent d'interrompre la communication avec la chaudière, et, pendant ce temps, de nettoyer le tube. Le chauffeur doit avoir fréquemment l'œil sur cet appareil, aussi précieux que simple.

Une surproduction momentanée de vapeur, un mauvais fonctionnement de la pompe d'alimentation provenant d'un accident subit, pourraient abaisser brusquement le niveau et surprendre le chauffeur pendant qu'il est occupé ailleurs. L'indicateur à tube de cristal ne suffit donc point. On y ajoute l'un ou l'autre des divers systèmes de flotteurs qui manifestent l'état insuffisant du niveau par des signaux bruyants. Tels sont, par exemple, les *flotteurs d'alarme*, le *flotteur magnétique*.

Un flotteur (c'est ordinairement une boule métallique creuse) monte et descend avec le niveau de l'eau de la chaudière. Il est soutenu par une tige qui forme l'un des bras d'un levier tournant autour du point fixe; l'autre bras supporte un contrepoids. Dans les limites normales du niveau de l'eau, la tige maintient une soupape contre l'ouverture d'un tuyau communiquant avec l'air extérieur. Si le niveau de l'eau s'abaisse au-dessous de ces limites, le flotteur s'abaisse avec lui et détermine l'ouverture de la soupape. La vapeur s'échappe par le canal et sort par un orifice annulaire; là elle rencontre les bords aigus d'un timbre A, qu'elle fait vibrer de manière à produire un son très intense et prolongé.

Le chauffeur est averti du danger par ce son inaccoutumé : de là le nom de *flotteur d'alarme* donné à cet appareil.

Le *flotteur indicateur à cadran* (fig. 264) est formé d'un disque de pierre, qu'une chaîne de suspension, s'enroulant sur la gorge d'une poulie à cadran extérieur F. soutient et équilibre par un contre-poids. Le mouvement de la poulie déterminé par les variations du niveau se communique à une aiguille qui indique ainsi la hauteur de l'eau dans la chaudière.

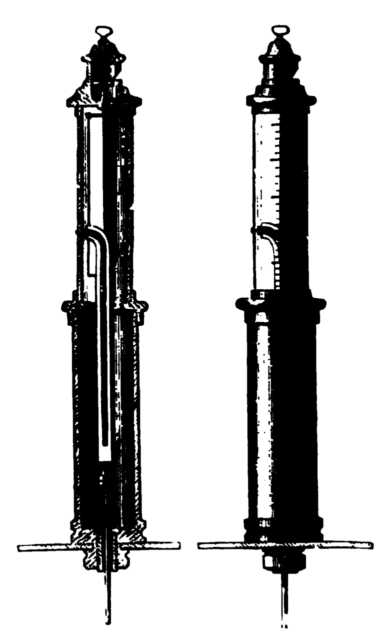


Fig. 265. — Indicateur magnétique de M. Lethuillier-Pinel.

Dans l'*indicateur magnétique* de M. Lethuillier-Pinel, qu'on emploie beaucoup aujourd'hui, le mouvement du flotteur se manifeste par une tige qui fait monter ou baisser avec lui un aimant en fer à cheval ; au devant des pôles de cet aimant, une aiguille aimantée, mobile sous l'influence de leur attraction, parcourt les degrés d'une division qui marque le niveau de l'eau de la chaudière. Quand ce niveau baisse d'une façon anormale et dangereuse, l'aimant entraîne avec lui le bras d'un levier qui fait ouvrir une soupape, auparavant maintenue par un ressort. La vapeur qui, de la chaudière, entre librement dans le tube renfermant tout le mécanisme, s'échappe en sifflant au dehors et avertit le chauffeur du danger.

Les appareils de sûreté d'une machine à vapeur ne comprennent point seulement les indicateurs de niveau, flotteurs ou autres. C'est que les causes d'explosion ne proviennent pas exclusivement de l'insuffisance de l'eau du générateur : dans des circonstances que nous préciserons plus loin, la vapeur peut acquérir une force élastique dépassant tout à coup, et de beaucoup, les limites de pression pour lesquelles la chaudière a été

construite. Pour prévoir ce cas, on adapte des soupapes de sûreté, dont la figure 264 représente en S, S la disposition ordinaire. Le jeu en est si simple, qu'il est inutile de le décrire au long. Ce n'est d'ailleurs autre chose que la soupape de la marmite de Papin, dont il a été question lorsque nous avons décrit le Digesteur du célèbre inventeur.

Il nous reste à dire comment on peut s'assurer à chaque instant, pendant le fonctionnement d'une machine, des variations de la tension de sa vapeur. Les instruments qui fournissent cette indication en atmosphères sont connus sous le nom de *manomètres*.

Mais les manomètres employés ne sont pas tous fondés sur le même principe. Les uns, comme le *manomètre à air libre* (fig. 266), sont tout simplement des baromètres à siphon dont la grande branche *b* est ouverte; seulement, ce n'est pas la pression de l'air atmosphérique qui soulève la colonne de mercure, c'est celle de la vapeur, la petite branche étant mise en communication directe en *a* avec la chambre de vapeur de la chaudière. C'est la différence des hauteurs du mercure dans les deux branches, augmentée de la pression barométrique, qui exprime la pression de la vapeur.

Les *manomètres à air comprimé* (fig. 267, 268) ne sont autre chose que des tubes de Mariotte. Par l'une des branches, la vapeur exerce librement sa pression, qui, dans l'autre branche, est équilibrée par l'air comprimé, plus par la différence de niveau du mercure. L'instrument est réglé de telle sorte, que le mercure est à une même hauteur *mn* dans les deux branches, si la pression de la vapeur vaut 1 atmosphère. Quand cette pression devient graduellement plus forte, le niveau s'élève en A, mais à des hauteurs décroissantes pour d'égales augmentations de pression, selon la loi de Mariotte. L'instrument est donc de moins en moins sensible aux pressions les plus élevées. On remédie à cet inconvénient en donnant au manomètre la disposition que montre la figure 268. La forme conique de la branche qui renferme l'air donne aux divisions correspondant

de vapeur connu dans la pratique sous le nom commun de *chaudière*. La chaudière, je l'ai déjà dit, varie beaucoup de dimensions et de formes, selon les types de machines auxquelles elle fournit la force ou le moteur. Nous allons voir successivement quelles sont les dispositions les plus usitées et les plus originales des chaudières dans les machines fixes, dans les machines marines et dans les machines mobiles, locomotives ou locomobiles.

§ 5. PRINCIPAUX TYPES DE CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Quand on veut faire bouillir de l'eau dans une marmite, l'idée la plus naturelle, la plus simple, est de mettre tout bonnement la marmite sur le feu : on ne songe guère à mettre le feu dans la marmite. Cela paraîtrait le renversement du bon sens. C'est cependant cette dernière idée qui est venue aux constructeurs de machines à vapeur. Au lieu de placer la chaudière sur le feu, ils se sont dit qu'il y aurait avantage à procéder d'une façon inverse, et à mettre le feu dans la chaudière. De cette manière, l'utilisation du combustible, cette condition première de l'industrie de la vapeur, se trouve réalisée à un plus haut degré.

Dans la chaudière à bouilleurs que nous venons de décrire, la chaudière est sur le feu : c'est un générateur *à foyer extérieur*. Il y a donc aussi des générateurs *à foyer intérieur*, et, sous ce seul rapport, on peut former deux types de chaudières, qui se subdivisent d'ailleurs en de nombreuses variétés. Enfin, on peut distinguer un troisième type, celui dans lequel le foyer proprement dit est extérieur, et dont les carneaux ou conduits des gaz de la combustion sont logés dans l'intérieur de la capacité renfermant l'eau. Ce sont les générateurs ou *chaudières mixtes*.

Les premières chaudières adoptées dans les machines de Watt étaient des chaudières en forme de chariot ou *en tombeau*,

à paroi inférieure en forme de voûte surbaissée. La flamme, après avoir échauffé directement la surface concave inférieure, revenait sur elle-même par des carneaux latéraux. Plus tard, elle a été employée sur les premiers bateaux à vapeur ; mais alors on y ajouta un carneau intérieur, par où passaient d'abord les gaz de la combustion avant d'entrer dans les carneaux latéraux, de manière à en former une chaudière mixte. La orme des parois de la chaudière en tombeau la rend peu résistante ; aussi l'histoire des accidents des machines à vapeur constate-t-elle que le plus grand nombre des explosions a eu lieu sur des chaudières de ce système. Mais presque partout elles ont été remplacées.



Fig. 270. — Chaudière à bouilleurs latéraux ; système Farcot.

Nous avons décrit la chaudière à deux bouilleurs inférieurs ; quelquefois il n'y a qu'un bouilleur ; certaines chaudières en ont jusqu'à trois. Une disposition intéressante et originale est celle des bouilleurs latéraux de la chaudière Farcot. Dans ce système (fig. 270), le foyer cylindrique principal A est chauffé directement par le foyer. Quatre bouilleurs sont placés verticalement les uns au-dessus des autres, dans un bâti latéral divisé en quatre compartiments ou carneaux, par lesquels sont obligés de passer successivement les gaz de la combustion avant de se rendre dans la cheminée. De plus, c'est le bouilleur inférieur A′ qui reçoit l'eau d'alimentation. Comme les gaz cheminent de haut en bas, tandis que l'eau suit un chemin inverse pour aller de A′ dans la chaudière, il en résulte que ce sont les parties les plus chaudes des gaz qui sont en contact avec les parois les plus chaudes de la chaudière ; les parties les plus froides perdent encore leur chaleur à échauffer l'eau la plus froide, avant de s'échapper dans la cheminée.

Imaginons que le corps cylindrique d'une chaudière renferme un tube intérieur d'un suffisant diamètre entièrement entouré par l'eau ; qu'on place le foyer dans ce tube, au lieu d'en faire seulement un carneau comme celui de la chaudière décrite plus haut : on aura une *chaudière à foyer intérieur*. Dans ce système, la chaleur du foyer est tout entière utilisée et employée à l'échauffement direct des parois métalliques de la chaudière, sans être absorbée par les maçonneries du bâti. Mais la surface de chauffe ne serait point encore assez grande, si la chaudière n'était extérieurement enveloppée par des carneaux, et alors les inconvénients d'un foyer nécessairement rétréci ne sont plus compensés par les avantages de cette disposition. Toutefois, en Angleterre, on emploie pour les machines fixes des chaudières horizontales à un ou deux foyers intérieurs.

Dans la plupart des modifications qu'a subies la chaudière primitive, on retrouve la préoccupation de développer le plus possible la surface de chauffe, tout en ménageant le volume et l'emplacement occupé par le générateur. Les bouilleurs, les carneaux intérieurs ou extérieurs, les foyers intérieurs, tout cela est imaginé dans le but d'utiliser l'activité du foyer, de manière à ne laisser échapper dans la cheminée que la portion des gaz chauds nécessaire pour produire le courant ascendant, c'est-à-dire le tirage.

Enfin, peu à peu on en arriva à concevoir la chaudière tubulaire, dont la première idée remonte à Barlow (1793), mais qui ne fut réalisée qu'en 1829, par Marc Seguin et Stephenson. Voici en quoi consiste le système des chaudières tubulaires, qui, appliqué d'abord sur les chemins de fer à la locomotive, a été adapté aux machines de navigation, avec les modifications indispensables.

Dans le corps cylindrique principal se trouvent soudés parallèlement entre eux des tubes qui s'ouvrent d'une part dans le foyer, d'autre part dans les carneaux ou dans la cheminée. Les tubes sont baignés par l'eau de la chaudière, qui remplit

tous leurs intervalles, et qui se trouve directement échauffée par les gaz traversant tous les espaces tubulaires. On verra plus loin dans quelle proportion énorme cette disposition ingénieuse accroît la surface de chauffe, et par suite la puissance de vaporisation du générateur.

Dans les locomotives, les locomobiles et les chaudières marines, le foyer se trouve entouré d'eau de tous côtés, sauf, bien entendu, par sa base, de sorte que la chaudière tubulaire pourrait aussi être considérée comme une chaudière à foyer intérieur. Elle en a certainement tous les avantages.

La figure 271 donne un exemple d'une chaudière tubulaire marine, qui est en même temps une *chaudière à retour de flamme,* puisque les gaz du foyer, avant de lécher les tubes, passent d'abord dans deux gros cylindres A et B, se réfléchissent sur le fond de la chaudière, et reviennent enfin, par les conduits tubulaires, dans la cheminée, où ils s'échappent.

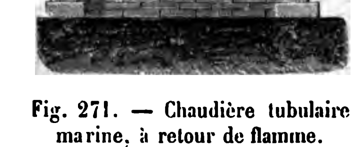


Fig. 271. — Chaudière tubulaire marine, à retour de flamme.

Outre les types qu'on vient de définir, il y a des chaudières dont le foyer peut être enlevé à volonté, *à foyer amovible*, selon l'expression technique. Cette disposition peut offrir des avantages de plus d'un genre, notamment celui d'un nettoyage rapide et de l'enlèvement des incrustations. Il y a aussi des *chaudières à circulation d'eau*, principalement formées de tubes où l'on introduit continuellement et successivement l'eau, qui se vaporise presque instantanément, de sorte que si l'introduction de l'eau est interrompue, il en est de même de la production et de l'écoulement de la vapeur; des *chaudières chauffées au gaz*, généralement employées dans les hauts fourneaux, où l'on utilise de la sorte les gaz perdus à leur sortie du gueulard, etc., etc.

De tous ces systèmes de chaudières, retenons-en un qui nous montrera comment on peut construire des générateurs pour ainsi dire rendus inexplosibles, par ce fait que l'eau, aussitôt introduite, est immédiatement réduite en vapeur : c'est la chaudière à circulation de M. Belleville, dont l'usage se répand de plus en plus dans la petite et la moyenne industrie, dans les centres populeux. Elle est utilisée dans plusieurs imprimeries et usines parisiennes. Une série de tubes verticaux, placés dans le foyer même (fig. 272), communiquent d'une part à un

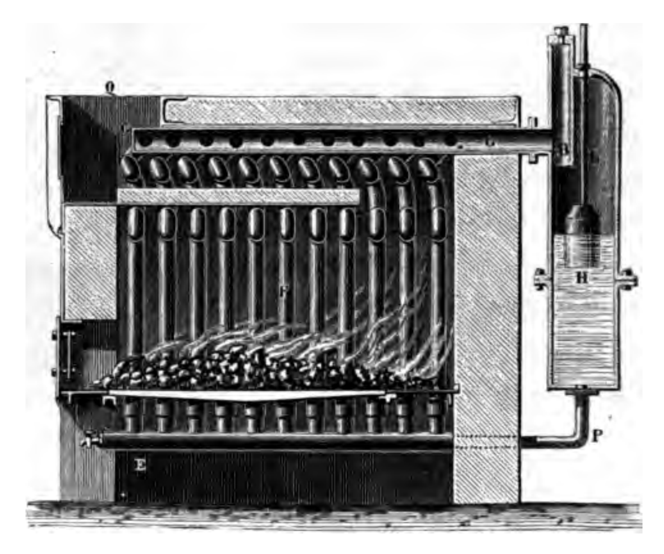


Fig. 272. — Chaudière à circulation; système Belleville.

tuyau horizontal E amenant l'eau d'alimentation, d'autre part au tuyau B de prise de vapeur. Chaque tube est rempli d'eau jusqu'à une hauteur la même pour tous, et forme pour ainsi dire une petite chaudière à moitié remplie d'eau et de vapeur. L'arrivée de l'eau dans les tubes est réglée, à l'aide d'un appareil spécial, par la pression même de la vapeur, de sorte qu'à mesure que l'eau se vaporise, elle se trouve remplacée par une quantité d'eau égale : le niveau dans les tubes de la chaudière reste ainsi constant.

La mise en vapeur est pour ainsi dire immédiate : pour une chaudière de ce système d'un volume moindre de 4 mètres

cubes (3^{mc},74) et de 10 mètres carrés de surface de chauffe, la vaporisation est de 200 kilogrammes d'eau par heure.

Il existe encore d'autres systèmes de chaudières à circulation : en France, ceux de MM. Isoard, Clavières, Larmanjat, Boutigny ; en Angleterre, ceux de M. Scott, Howard, Hayward, Tyler et Field. Nous ne pouvons que les citer, en résumant en quelques lignes, d'après M. le général Morin, les avantages respectifs des grandes chaudières ordinaires comparées à ces systèmes nouveaux.

Les premières ont pour elles la sanction d'une longue expérience : elles produisent, sans beaucoup de soin et d'entretien, et très régulièrement, la vapeur nécessaire ; la manœuvre journalière en est simple, commode. Mais elles occupent un grand espace ; elles sont sujettes aux explosions.

Au contraire, les chaudières à circulation, beaucoup moins encombrantes et moins coûteuses, pour ainsi dire inexplosibles, ont l'avantage d'une mise en vapeur rapide ; mais elles sont d'un entretien plus difficile ; elles ne sont pas plus économiques au point de vue du combustible. Elles paraissent surtout réservées aux machines de la petite industrie.

La vapeur étant produite, voyons comment on en utilise la force élastique, ou, si l'on veut, comment on emploie cette force à donner le mouvement aux organes de la machine.

CHAPITRE VIII

LA MACHINE A VAPEUR — LE MÉCANISME MOTEUR

§ 1. LE CYLINDRE MOTEUR.

La vapeur sort du réservoir de la chaudière par un tuyau qui la conduit à l'intérieur d'un cylindre ; alternativement elle agit sur une face ou sur l'autre d'un piston mobile dans ce cylindre; et enfin de cette action alternative résulte un mouvement de va-et-vient du piston et de sa tige. Étudions les détails de ce mécanisme.

La vapeur, arrivant à la chaudière dans le cylindre, agit d'abord sur l'une des faces du piston, qui se trouve poussé vers l'extrémité opposée. A ce moment, la vapeur doit pénétrer de l'autre côté du corps de pompe et exercer son action sur l'autre face du piston. Pour que cette action soit possible, il est nécessaire qu'on se débarrasse de la vapeur qui vient d'agir en sens inverse, parce que la force élastique qu'elle possède encore s'opposerait au mouvement. On parvient à ce résultat en donnant alternativement à la vapeur qui a joué son rôle une issue à l'extérieur du cylindre. L'espace dans lequel elle pénètre est tantôt l'air libre, tantôt un vase vide d'air et maintenu, par un jet continu d'eau froide, à une basse température.

Dans le premier cas, qui est toujours celui des machines où la vapeur fonctionne *à haute pression*, c'est-à-dire avec une force élastique égale à plusieurs atmosphères, la vapeur qui vient de travailler s'échappe, et sa tension se trouve rapide-

ment réduite à celle de l'atmosphère elle-même, ce qui permet à la vapeur d'agir sur la surface opposée au piston.

Dans le second cas, la vapeur se condense brusquement par son introduction dans l'espace vide et froid qui, pour cette raison, est nommé *condenseur*. Sa force élastique, qui pouvait n'être guère supérieure à 1 atmosphère, est instantanément annulée, ou du moins considérablement réduite, de sorte que la chambre du cylindre où elle vient d'agir est elle-même ramenée au vide : la vapeur introduite de l'autre côté n'a donc plus à vaincre que l'obstacle du piston lui-même.

Les divers mécanismes imaginés pour conduire ainsi la vapeur dans le cylindre de chaque côté du piston, puis à l'air libre ou dans un condenseur, pour détruire ou réduire, dès qu'elle a agi, sa force élastique, constituent ce qu'on nomme la *distribution de la vapeur ;* on va voir quels sont les principaux systèmes employés dans ce but.

Parlons d'abord du *cylindre*, la pièce capitale du mécanisme moteur.

C'est, le plus ordinairement (fig. 275), une pièce coulée en fonte dont l'intérieur, de forme parfaitement cylindrique, a été tourné et alésé avec le plus grand soin ; un des fonds est quelquefois venu de fonte, d'autres fois vissé solidement comme l'autre fond, de manière que l'un des deux au moins puisse être enlevé entièrement et permettre ainsi l'introduction du piston. L'un des fonds donne passage à la tige *tt* du piston P, et l'ouverture qui sert à cet objet est munie d'une boîte à étoupe *bb* (*stuffing-box*), afin que la tige, dans son mouvement, ne présente aucune fuite à la vapeur du cylindre.

Quant au piston lui-même, on le construit d'une foule de manières différentes. Le plus souvent il est formé de deux plateaux métalliques d'un diamètre un peu plus petit que celui du cylindre et solidement reliés entre eux, ainsi qu'à la tige qui les traverse. Sur leur pourtour sont ménagées des gorges pour loger la *garniture*, c'est-à-dire la partie du piston dont la surface extérieure doit glisser à frottement doux, mais parfaite-

ment étanche, contre la surface intérieure du cylindre, de manière que la vapeur ne puisse passer de l'une des chambres dans l'autre. La garniture était jadis formée de tresses de chanvre qu'il fallait graisser souvent et remplacer de même, à cause de la rapidité de l'usure. On y a substitué avantageusement des garnitures métalliques, formées de fragments d'anneau pressés par des ressorts intérieurs, comme on le voit dans la figure 273. Aujourd'hui on préfère encore à ce mode de garniture celui des pistons Ramsbottom, dont le corps se com-

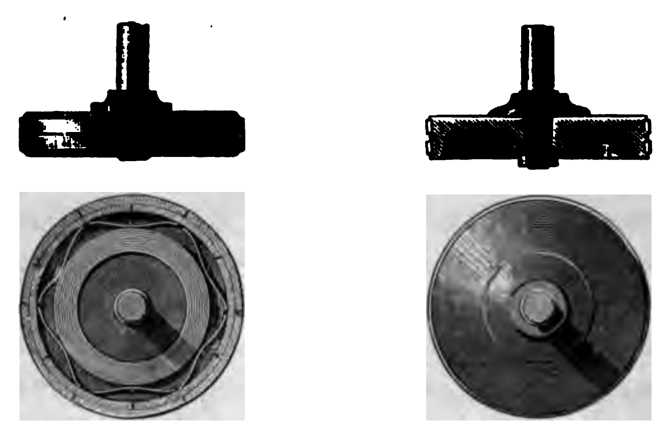


Fig. 273. — Piston à ressort. Fig. 274. — Piston suédois.

pose d'un plateau unique, évidé pour avoir plus de légèreté et entouré de deux cercles d'acier doux fondu, qui s'engagent dans deux gorges extérieures et font ressort. La surface de ces cercles presse ainsi les parois du cylindre, formant une excellente garniture, très simple et très peu coûteuse d'entretien. Le *piston suédois* (fig. 274) ne diffère du précédent que par la largeur des cercles, qui est plus grande, et leur composition, qui est de fonte durcie par un peu d'étain.

§ 2. DISTRIBUTION DE LA VAPEUR.

Le piston et le cylindre ainsi construits et agencés, il nous reste à voir comment se font l'introduction et l'échappement, en un mot la *distribution de la vapeur*.

Reportons-nous à la figure 275, qui donne la section longitudinale d'un cylindre. On voit en *a*, *a'*, près de chacun des fonds, l'ouverture d'un double conduit *aa*, *a'a'*, pratiqué dans l'épaisseur de la face latérale : ce sont les ouvertures par où la vapeur arrive alternativement et agit sur l'une, puis sur l'autre face du piston; on les nomme les *lumières d'admission*. Ces deux lumières débouchent extérieurement sur une face bien dressée, et, entre les deux, on voit une troisième ouverture E, qui sert à faire échapper la vapeur quand elle a produit son effet, et qu'on nomme pour cette raison *lumière d'échappement*. C est le tuyau par où la vapeur se répand à l'air libre, ou bien va perdre sa force élastique dans le condenseur.

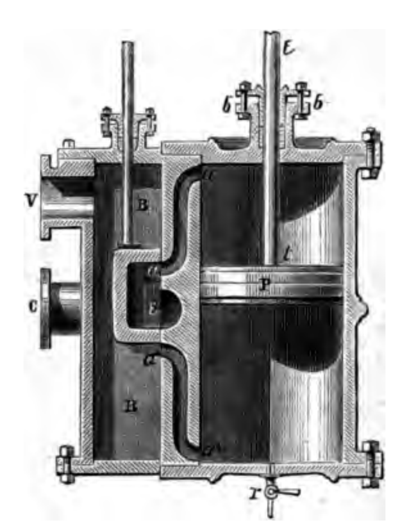


Fig. 275. — Coupe longitudinale d'un cylindre.

Maintenant, par quel mécanisme s'opère la distribution, formée, comme on voit, de deux opérations partielles, l'admission de la vapeur et l'échappement, qui doivent se répéter deux fois pour obtenir une phase complète du mouvement de va-et-vient du tiroir? Il y a divers modes employés, suivant les machines : décrivons d'abord celui que représente notre dessin.

On voit, dans la *boîte à vapeur* BB, une boîte prismatique ouverte par une face, et qu'on nomme le *tiroir*. Le tiroir s'applique par sa face ouverte contre le plan bien dressé où nous venons de voir que débouchent extérieurement les trois lumières. L'espace BB se nomme la boîte à vapeur, parce qu'en effet la vapeur amenée de la chaudière par le tuyau V y afflue librement; mais la capacité du tiroir, au contraire, est toujours fermée à la vapeur affluente, tandis qu'elle communique constamment avec le tuyau d'échappement, et aussi tantôt avec

l'un, tantôt avec l'autre des conduits d'admission du cylindre. Enfin, le mouvement du tiroir est produit par la machine même à l'aide d'une tige et d'un excentrique calé sur l'arbre du volant.

En suivant le mouvement successif et alternatif du tiroir représenté sur la figure 276, on comprendra aisément les phases de la distribution de la vapeur.

Tel est le mécanisme de la distribution de la vapeur dans les machines où le *tiroir à coquilles* est adopté. Mais, comme je l'ai dit, il y a eu et l'on emploie encore d'autres dispositions. C'est d'abord le système des *soupapes de distribution* de Watt;

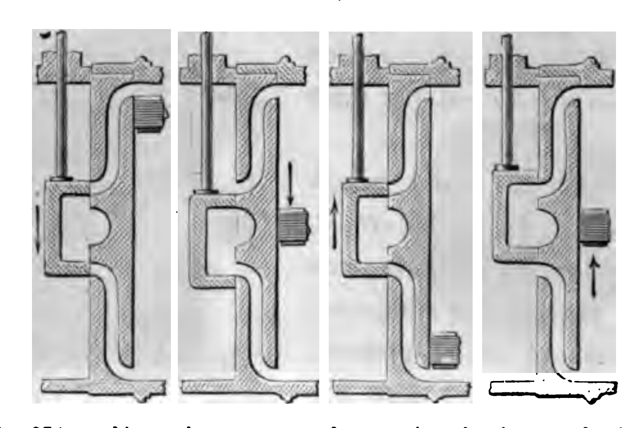


Fig. 276. — Phases du mouvement de va-et-vient du piston et du tiroir.

puis le *tiroir à pistons*, également imaginé par cet inventeur; enfin le *tiroir en D*, dont le nom est dû à la ressemblance de la section de la pièce principale avec la lettre D (fig. 277).

Dans le premier de ces trois systèmes, deux boîtes à soupapes sont adaptées aux deux extrémités du corps du cylindre. Chacune d'elles se trouve divisée par deux soupapes mues par un système de tringles en trois compartiments, dont celui du milieu est en communication directe avec chaque lumière, tandis que les deux autres communiquent, le supérieur avec le tuyau de vapeur, l'inférieur avec l'air extérieur ou le condenseur.

Le *tiroir à pistons* est ainsi nommé parce que ce sont deux

pistons, mus par une tige dans un espace cylindrique contigu au cylindre, qui tantôt laissent à la vapeur l'accès libre d'une des lumières d'admission, et de la chambre correspondante du cylindre, tantôt mettent cette chambre et la vapeur qui vient d'agir en communication avec le condenseur.

Enfin, le *tiroir en D* (fig. 277) est une pièce creuse, mobile dans la boîte à vapeur, qui s'applique et glisse par ses deux extrémités planes contre la face du cylindre où viennent aboutir les lumières d'admission. La vapeur qui vient de la chaudière par l'ouverture V peut toujours circuler autour du tiroir sans pénétrer jamais par l'une ni par l'autre de ses extrémités;

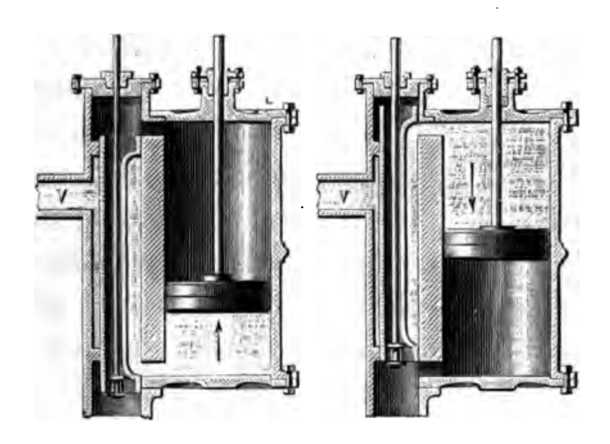


Fig. 277. — Distribution de la vapeur; tiroir en D.

celles-ci sont au contraire sans cesse en libre communication avec le condenseur. Les deux bords plans du tiroir, dans leur mouvement de va-et-vient, laissent donc alternativement l'une des lumières recevoir la vapeur de la chaudière, pendant que la vapeur, après son action sur le piston, sort par l'autre lumière et se précipite dans le condenseur ou à l'air libre.

Dans chacun de ces modes de distribution, il est aisé de saisir les mouvements correspondants du piston, des tiroirs et des soupapes, dans leurs diverses phases. Ce que nous avons dit en décrivant le tiroir à coquilles suffira pleinement, croyons-nous, à en donner l'intelligence.

§ 3. DÉTENTE DE LA VAPEUR.

En se reportant aux allées et venues correspondantes du piston et des diverses pièces qui constituent le mode de distribution de la vapeur, on peut voir que nous avons toujours supposé que les deux lumières du cylindre avaient la même largeur que les bandes pleines du tiroir, de sorte qu'elles se trouvaient tantôt entièrement recouvertes, tantôt entièrement libres. De là il résulte que la vapeur de la chaudière afflue à pleine pression sur chaque face du piston pendant toute la durée de la course de celui-ci : c'est ce qu'on exprime en disant que la *vapeur travaille à pleine pression*.

A l'origine, on ne connaissait point d'autre moyen de faire agir la vapeur. Watt, dont on retrouve le nom dans presque toutes les découvertes capitales qui ont transformé la machine à vapeur primitive, a trouvé qu'il y avait un double avantage à ne donner accès à la vapeur de chaque côté du cylindre que pendant une partie seulement de la course du piston : il en résulte d'abord une plus grande régularité dans le mouvement même; puis, à égalité de travail, une notable économie de vapeur, et par conséquent de combustible.

La vapeur, introduite par exemple pendant le premier tiers seulement de la course du piston, continue d'agir sur celui-ci; mais comme l'espace qu'elle occupe ensuite va en augmentant jusqu'à la fin, elle agit en se dilatant comme un ressort qui se détend, de sorte que sa force diminue jusqu'à la fin de la course du piston. On dit alors que *la vapeur travaille avec détente*.

Ce mode d'action de la vapeur est aujourd'hui presque universellement adopté. Mais, avant d'insister sur les avantages qu'il présente, et de préciser l'économie de vapeur ou de combustible à laquelle la détente donne lieu, il faut que nous montrions par quelle modification du mécanisme de distribution on parvient à l'obtenir.

Là encore, si nous voulions faire un traité complet de la machine à vapeur, nous aurions à décrire des systèmes variés de détente. Il nous suffira, pour le but que nous nous proposons, de donner une idée d'un ou deux des plus importants.

Commençons par le *système de détente* dit *de Clapeyron*, parce que cette disposition est due à ce savant ingénieur.

Elle consiste dans une simple modification du tiroir, ou plutôt de la largeur des bandes qui recouvrent les lumières. Au lieu de donner à cette largeur la dimension précise de celle de chaque lumière, on la fait plus grande. Les rebords *ab*, *a'b'*, *cd*, *c'd'*, extérieurs et intérieurs, forment ce qu'on nomme le *recouvrement* du tiroir, parce que l'objet de ces saillies est de diminuer la durée de l'admission de la vapeur dans le cylindre par chacune des deux lumières. Il faudrait entrer dans des détails trop longs, trop techniques, pour suivre le mouvement du tiroir à détente dans toutes ses phases et pour faire voir clairement quel est, aux mêmes phases, le mode d'action de la vapeur. Mais nous pouvons résumer cette action en disant que chaque introduction de la vapeur dans le cylindre donne lieu à quatre périodes successives, que nous allons caractériser.

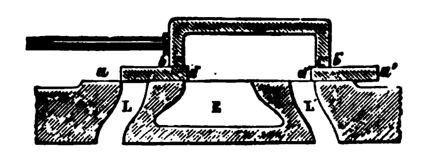


Fig. 278. — Système de détente de Clapeyron; tiroir à recouvrement.

Dans la première période, il y a *admission de la vapeur*, qui travaille pendant ce temps à pleine pression, c'est-à-dire avec la pression de la chaudière; après quoi la lumière d'admission se ferme.

Dans la seconde période, il y a *détente de la vapeur* admise, qui alors travaille avec une force décroissante jusqu'au moment où la lumière s'ouvre à l'échappement.

L'*échappement* caractérise donc la troisième période; mais comme, par le fait du recouvrement, l'échappement cesse avant que le piston ait atteint le fond du cylindre, il y reste une certaine quantité de vapeur que le piston refoule et com-

prime un peu avant le début de la période nouvelle d'admission.

De là la *période de compression*, qui termine le cycle des mouvements alternatifs du tiroir, et ramène le piston à la même position initiale.

La détente de Clapeyron est surtout employée dans les machines à mouvements rapides, telles que les locomotives.

Dans le système de détente de Meyer, le tiroir est percé de deux orifices qui viennent alternativement communiquer avec

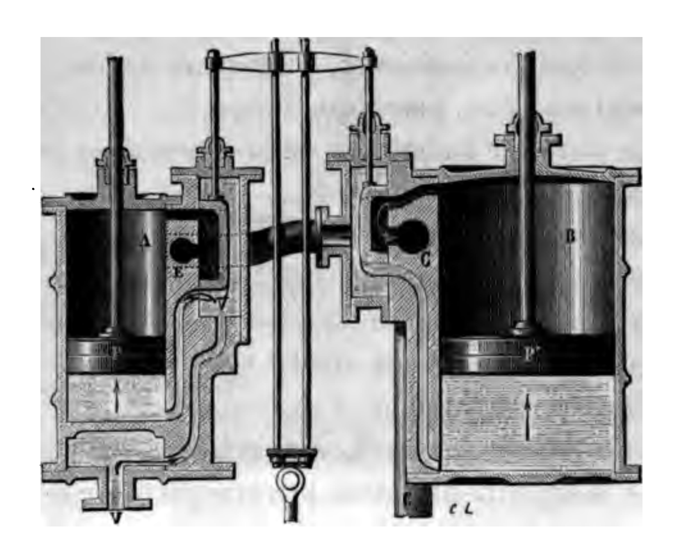


Fig. 279. — Coupe des deux cylindres dans le système de détente de Woolff.

les lumières d'admission : ce sont deux blocs, ayant un mouvement indépendant de celui du tiroir, qui viennent fermer ces orifices, faire cesser l'admission et commencer la détente.

Enfin, dans le système de Woolff, la détente n'a pas lieu dans le cylindre lui-même, mais dans un cylindre de plus grand diamètre, juxtaposé au premier (fig. 280). C'est pour cela qu'on donne aux machines à vapeur qui emploient ce mode de détente, le nom de *machines à deux cylindres*.

La figure 279 va faire comprendre le mécanisme de la distribution dans ces machines.

Chacun des deux cylindres A, B est muni d'une boîte à

vapeur où se meut un tiroir ordinaire, et des lumières d'admission et d'échappement disposées comme on sait.

C'est par l'orifice V qu'arrive la vapeur de la chaudière, laquelle se répand d'abord dans la boîte du cylindre A, et de là pénètre au-dessous du piston P, par exemple. Ce piston reçoit donc un mouvement de bas en haut; il refoule la vapeur qui était de l'autre côté dans le tuyau d'échappement E, tuyau

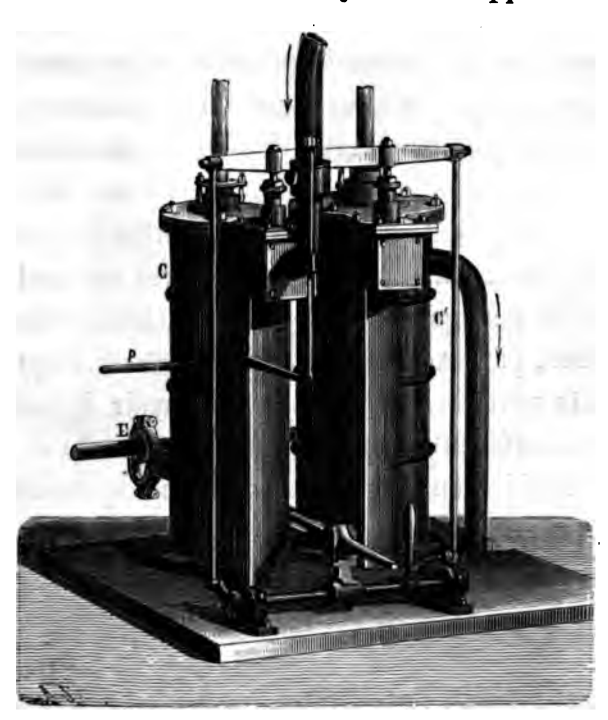


Fig. 280. — Système de distribution et de détente de Woolff; les deux cylindres.

qui, au lieu de communiquer avec le condenseur comme dans les machines à un seul cylindre, va déboucher dans la boîte à vapeur du cylindre B. Là elle pénètre par la lumière inférieure d'admission au-dessous du piston P', et, en s'y détendant, elle produit également le mouvement ascendant de ce piston. Quant à la vapeur qui se trouvait de l'autre côté dans la chambre supérieure du grand cylindre, elle va, comme à l'ordinaire, se condenser dans le tuyau CC ou à l'air libre.

Le mouvement simultané des deux tiroirs en sens inverse

donnera lieu à un mouvement des deux pistons de haut en bas, la vapeur agissant à pleine pression dans le petit cylindre, tandis que dans le grand cylindre elle agit toujours avec détente.

§ 4. LE MÉCANISME DE TRANSMISSION.

Il nous reste à montrer comment le mouvement du piston est transmis, par quel mécanisme on le transforme, on le règle, on en assure la régulière continuité. Le problème à résoudre n'est pas spécial aux machines à vapeur. Un moteur quelconque peut donner lieu à la même question : « Étant donné le mouvement de va-et-vient de la tige d'un piston, c'est-à-dire un mouvement alternatif et rectiligne, trouver un mode de transmission qui le change en mouvement continu et circulaire, qui fasse tourner, par exemple, un arbre moteur auquel tous les mouvements partiels dont l'usine peut avoir besoin viendront puiser simultanément ou à leur tour. »

Passons rapidement en vue les différents systèmes imaginés.

Le plus ancien, qui est encore adopté pour un grand nombre de machines, comprend les *machines à balancier*, dont la figure 281 donne le principe.

La tige *t* du piston, dont l'extrémité décrit une ligne droite verticale, est reliée à l'extrémité d'une grande pièce oscillante, ou levier, AB, qu'elle fait mouvoir autour d'un point fixe I, dans un plan vertical. Cette pièce est le *balancier*, à l'autre extrémité duquel s'articule une tige ou *bielle*, qui agit à son tour sur une manivelle calée en O sur l'arbre à mettre en mouvement. Grâce à cette disposition, le mouvement rectiligne alternatif du piston se trouve transformé en mouvement circulaire continu. Ici le balancier est au-dessus de la tige du piston; mais il peut aussi être placé au-dessous, et nous verrons des exemples de cette disposition dans les machines à vapeur marines.

Par le balancier, la bielle et la manivelle, le mouvement

alternatif et rectiligne du piston se trouve transformé en mouvement circulaire continu ; mais cette transformation n'est pas directe, car les extrémités du balancier oscillent en décrivant chacune un arc de cercle, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre; le mouvement est donc d'abord circulaire alternatif; c'est la bielle et la manivelle qui achèvent la transformation et produisent la continuité du mouvement circulaire. Il résulte de là que la tige du piston, qui se meut verticalement, ne peut être directement liée à l'extrémité du balancier, parce que celle-ci la forcerait à suivre le contour de l'arc, et dès lors la courberait tantôt à droite, tantôt à gauche. Dans le but d'éviter

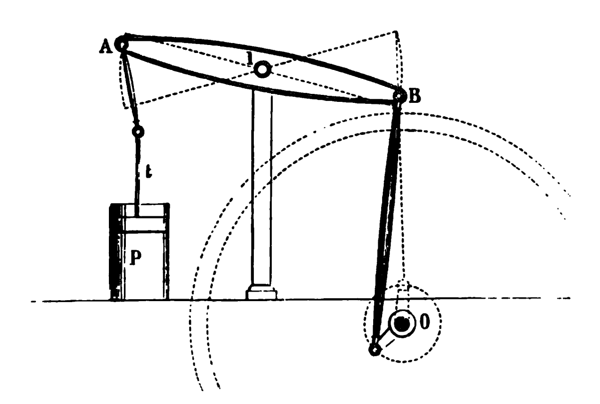


Fig. 281. — Principe de la transmission dans les machines à balancier.

cet inconvénient, qui détériorerait promptement la machine, Watt a imaginé un système d'articulation fort ingénieux, connu sous le nom de *parallélogramme de Watt*, et dont voici la description succincte :

La tige du piston, au lieu d'être liée directement à l'extrémité E du balancier (fig. 282), l'est au sommet D du parallélogramme CBDE, dont les quatre côtés, rigides et de dimensions invariables, sont articulés aux sommets, de sorte que les angles varient suivant le mouvement qu'impriment les oscillations du balancier. De plus, le sommet B est rattaché, par une tige BO, à un point fixe O du bâti de la machine. Les longueurs relatives de ces diverses lignes sont calculées de telle sorte, que le som-

met D décrit très sensiblement une ligne droite verticale, pendant que les points C, E, B, décrivent des arcs de cercle ayant pour centres les deux points O, O. A la vérité, pour qu'il en soit ainsi, l'oscillation du balancier ne doit pas dépasser les limites de 20° de part et d'autre de l'horizontale. Le point milieu du côté BC jouit de la même propriété que le point D : aussi l'uti-

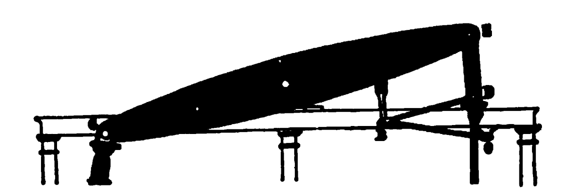


Fig. 282. — Parallélogramme articulé de Watt.

lise-t-on dans les machines de Woolff, où les pistons des deux cylindres doivent se mouvoir d'ensemble.

On comprend que le système qu'on vient de décrire se reproduit en double, dans le sens de l'épaisseur, de chaque côté du balancier, ce qui fait qu'en réalité la tige du piston est articulée à un axe horizontal reliant le double point D.

§ 5. LES RÉGULATEURS.

On voit, en suivant la figure 284 (p. 650), que, sur l'arbre moteur mû par le système de bielle et de manivelle décrit plus haut, est montée une grande roue V, le plus souvent de fonte, à laquelle on donne le nom de *volant*. Cette pièce, qui se trouve dans toutes les machines motrices, a pour objet de régulariser le mouvement.

Dans une machine motrice telle que la machine à vapeur, la vitesse est sujette à éprouver des variations qui peuvent dépendre, soit de la force motrice elle-même, c'est-à-dire de la vapeur qui sort du générateur plus ou moins abondante et douée d'une pression plus ou moins considérable, soit de l'emploi de la force dans l'usine où la machine est établie. On com-

prend qu'il y ait intérêt à ce que ces variations soient renfermées dans des limites restreintes : on y parvient de diverses manières, et, en premier lieu, par l'emploi des volants qui augmentent la masse des parties mobiles de la machine. Lorsqu'il y a excédent de vitesse, la masse du volant absorbe l'excès de travail moteur sous forme de force vive, qu'elle restitue, quand le mouvement se ralentit, aux diverses pièces de la machine. On donne à la fois au volant un grand poids et un grand diamètre, et la plus grande partie de sa masse se trouve répartie dans l'anneau qui en forme la circonférence.

Les dimensions et les poids des volants se calculent en tenant compte à la fois de la puissance de la machine et de l'irrégularité plus ou moins grande du travail moteur et du travail résistant.

L'emploi d'un volant, pour régulariser le mouvement d'une machine à vapeur, ne remplit son objet qu'autant que la vitesse est tantôt supérieure, tantôt inférieure à la vitesse normale. Mais s'il y avait lieu de craindre que cette vitesse ne fût toujours en excès ou toujours en défaut, le volant n'y pourrait rien, attendu qu'il acquerrait lui-même une vitesse trop grande ou trop petite, et cet excès pourrait, dans le premier cas, aller en augmentant jusqu'à la rupture. La force centrifuge, qui croît avec le carré de la vitesse, serait la cause de cet accident, que prévient l'usage d'un autre genre de régulateur.

Je veux parler du *régulateur à force centrifuge*, à l'aide duquel la machine règle d'elle-même sa vitesse quand la vapeur afflue de la chaudière avec surabondance ou excès de pression, ou quand la vapeur, n'arrivant pas en quantité suffisante, la vitesse du moteur se ralentit.

Cet appareil se compose de deux boules métalliques B, B, supportées par deux tiges OA, OA′, articulées autour du point fixe O appartenant à un axe vertical. Deux autres tiges, articulées en A et A′, sont liées à un manchon ou collet M, qui embrasse l'axe vertical et s'élève ou s'abaisse le long de cet axe. Tout le système reçoit d'ailleurs, par l'intermédiaire d'une

poulie P, un mouvement de rotation emprunté à l'arbre moteur de la machine. Enfin, le manchon M est embrassé par une fourchette formant une extrémité d'un des bras du levier IL.

Quand la machine fonctionne avec sa vitesse réglementaire, le levier MIL reste horizontal. Si la vitesse s'accélère, la force centrifuge éloigne les boules de l'axe, le manchon s'élève, et avec lui le bras du levier IM; l'autre bras, IL, s'abaisse en tournant autour du point I. Si, au contraire, la vitesse se ralentit, la force centrifuge diminue, et les boules se rapprochent de l'axe, ce qui fait abaisser le manchon et produit un mouvement opposé du levier.

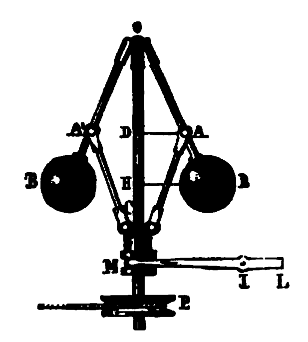


Fig. 283. — Régulateur de Watt à force centrifuge.

Or le levier communique avec une valve du tuyau amenant la vapeur de la chaudière, de telle façon que la valve se ferme progressivement dans le premier cas, et s'ouvre davantage dans le second. L'afflux de la vapeur se trouve donc diminué quand la vitesse de la machine dépasse la limite normale; elle est introduite, au contraire, avec plus d'abondance s'il y a eu ralentissement.

Mentionnons encore deux autres systèmes de régulateurs (Farcot et Flaud), dont la disposition est un peu différente de celle du *régulateur à force centrifuge* (on connaît aussi ce dernier sous les noms de *modérateur de Watt* ou de *pendule conique*). Tous deux sont, comme le premier, fondés sur l'action de la force centrifuge appliquée à des masses qui tournent avec un axe mis en mouvement par la machine. Mais le pendule conique a l'inconvénient, que les régulateurs Farcot et Flaud n'ont pas, de régler, avec la vitesse de régime, la puissance de la machine, tandis que ceux-ci permettent de faire varier cette puissance sans que la vitesse de régime varie sensiblement, ce qui est utile dans certaines industries.

CHAPITRE IX

DIVERS TYPES DE MACHINES A VAPEUR

§ 1. MACHINE A BALANCIER DE WATT.

Revenons maintenant au mécanisme de transmission, et faisons voir comment le mouvement, soit du balancier, soit de l'arbre moteur, est utilisé pour le fonctionnement du tiroir, des pompes d'alimentation et d'épuisement.

Sur l'arbre moteur de la machine est calé un *excentrique*, qu'on voit en *dd* sur la figure 284, et dont la fonction est de produire le mouvement alternatif du tiroir. Voici, en deux mots, comment s'obtient ce résultat. L'excentrique est formé d'une pièce métallique circulaire traversée par l'arbre en un point qui n'est pas son centre. Son mouvement de rotation entraîne celui d'un collet ou bride portant un long triangle métallique. Mais l'extrémité de ce dernier s'accroche à l'une des branches d'un levier coudé, dont l'autre branche porte la tringle du tiroir. Le mouvement d'oscillation du levier produit par la rotation de l'excentrique donne lieu à un mouvement alternatif vertical de la tige, et le tiroir fonctionne comme nous l'avons montré plus haut.

La figure 284 représente la machine à vapeur à balancier, telle qu'elle est sortie des mains de Watt, avec tous les perfectionnements que cet illustre mécanicien y a successivement apportés ; elle permettra au lecteur de saisir l'ensemble des divers mécanismes que nous avons dû décrire en détail et sépa-

rément, la distribution comme la transmission. Elle va nous montrer en même temps comment fonctionnent les diverses pompes dont il a été question dans notre description de la machine. H est le condenseur qui baigne dans une bâche d'eau froide RR, et qui reçoit l'eau de cette bâche par un tuyau *t*. Comme la condensation de la vapeur ne peut se faire sans que celle-ci cède à l'eau la chaleur qui la maintient à l'état gazéiforme, l'eau du condenseur s'échauffe constamment, et il

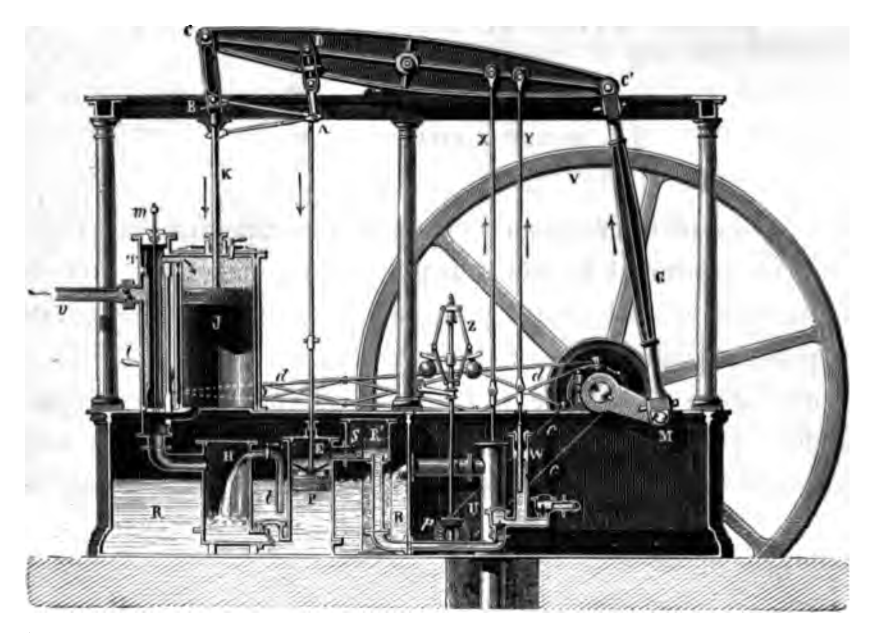


Fig. 284. — Machine à balancier de Watt : *v*, tuyau de prise de vapeur; T, tiroir; J, cylindre: H, condenseur; PE, pompe d'épuisement; WY, pompe alimentaire de la chaudière; UX, pompe d'alimentation de la bâche R; *pZ*, régulateur; *dd*, excentrique; ABCD, parallélogramme; GM, bielle et manivelle; V, volant.

importe de la remplacer, constamment aussi, par de nouvelle eau froide. De là la nécessité d'une pompe d'épuisement E, qui est mue par la tige EA reliée au balancier; cette pompe refoule l'eau extraite et chaude dans une capacité R′, et c'est là qu'agit à son tour la pompe alimentaire W, pour puiser l'eau et la refouler dans la chaudière. Y est la tige de cette pompe qui reçoit son mouvement du balancier.

Enfin on voit, en XX, la tige de la pompe U, qui sert à alimenter d'eau froide la bâche RR. Cette pompe, ordinairement

plus puissante que les deux autres, va chercher l'eau d'alimentation à une source voisine, fontaine, puits ou rivière.

Cette complication d'organes, d'appareils accessoires, qui du reste empruntent tous leurs mouvements de la machine à vapeur, n'existe que dans les machines à condensation, c'est-à-dire à basse ou à moyenne pression. Dans les machines à haute pression, fixes ou mobiles, le condenseur, les pompes d'épuisement et tous les mécanismes qui s'y rapportent sont supprimés. Il n'y a plus que la pompe d'alimentation. Mais nous avons pris pour modèle précisément la machine à vapeur la plus compliquée, afin de ne rien oublier d'essentiel pour l'explication des mécanismes employés dans les différents types.

§ 2. MACHINES A VAPEUR A TRANSMISSION DIRECTE.

La transmission du mouvement dans les machines à balancier se fait indirectement, puisque le mouvement du piston devient circulaire alternatif avant de devenir continu.

On a imaginé plusieurs moyens de transmettre directement le mouvement du piston à l'arbre de couche. De là les machines *verticales*, *horizontales*, *oscillantes*. Je vais donner un modèle de chacun de ces genres de machines.

La *machine verticale*, ou à *cylindre vertical*, que représente sous ses deux faces la figure 285, est une machine à haute pression, dans laquelle la vapeur agit avec détente, mais sans condensation. La légende montre quels sont les divers organes, cylindre, tiroir, volant, régulateur ou pendule conique, etc. Le seul point sur lequel nous devons attirer l'attention est le mode de transmission du mouvement. La tige du piston est directement articulée à la bielle EF, qui agit sur la manivelle de l'arbre moteur. Cette tige est guidée dans son mouvement par une glissière, pièce horizontale mobile GG, qui se meut le long de deux montants verticaux fixés en K et H, c'est-à-dire, d'une part au cylindre, de l'autre au bâti de fonte de la ma-

chine. C'est, à la vérité, un mode de transmission tout semblable que celui de la *machine à cylindre horizontal* représentée par la figure 286. Nous en avons dit assez pour faire comprendre, sans description spéciale, la disposition des organes de cette machine.

Dans les locomotives, nous verrons employer tantôt les cylindres horizontaux, tantôt les cylindres inclinés ; les raisons pour

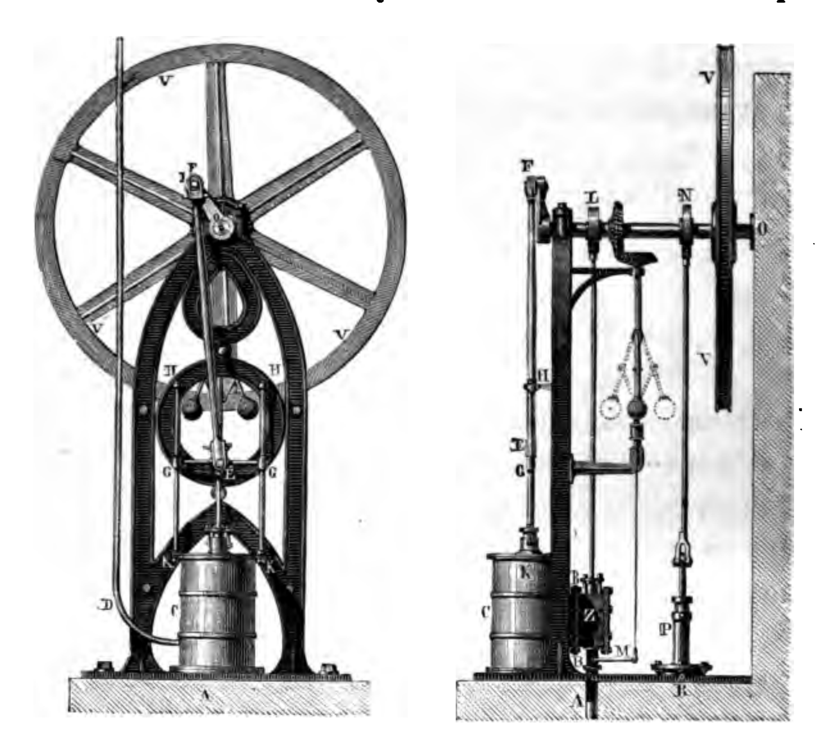


Fig. 285. — Machine à vapeur verticale : A, tuyau de prise de vapeur ; C, cylindre ; B, Z, tiroir et boite à vapeur ; KGH, glissière ; E, F, J, O, bielle, manivelle et arbre moteur ; VV, volant ; NPR, pompe alimentaire ; D, tuyau d'échappement.

lesquelles on préfère telle ou telle de ces dispositions, qui n'ont rien d'essentiel, sont en rapport, soit avec la construction et l'agencement général des organes de la machine, soit, pour les machines fixes, avec des questions d'emplacement en surface, en hauteur, etc.

Dans les *machines à fourreau*, la tige du piston est elle-même supprimée et la bielle est directement articulée au piston lui-même. Le mouvement oscillant de cette bielle se fait dans

un manchon ou fourreau cylindrique traversant le cylindre et que le piston enveloppe complètement. Cette disposition diminue la surface du piston recevant l'action de la vapeur; il faut donc compenser cette diminution par un accroissement du diamètre du cylindre. L'inconvénient de ce mécanisme très simple est aisé à comprendre : d'une part, la vapeur se refroidit plus promptement, puisque la surface refroidissante y est plus considérable; d'autre part, les fuites s'y produisent plus facile-

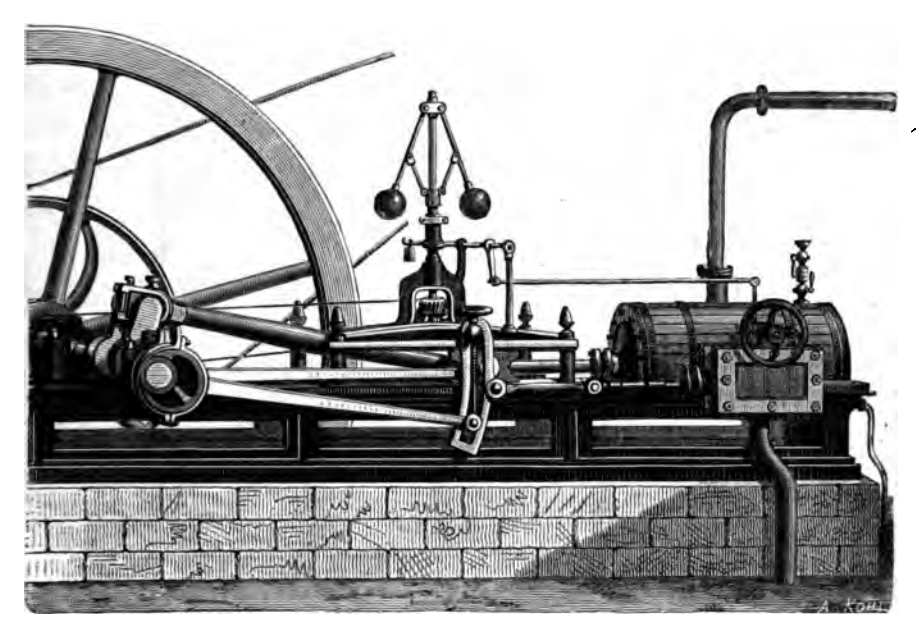


Fig. 286. — Machine à vapeur horizontale.

ment, soit autour du manchon, soit par les rainures qui permettent le mouvement du piston.

Ce mode de transmission est principalement adopté dans les machines marines anglaises.

Un fabricant français, M. Carré, a imaginé et construit le premier les *machines à cylindre oscillant*, où la transmission se fait sans bielle, la tige du piston étant elle-même articulée directement à la manivelle de l'arbre moteur.

Le cylindre des machines oscillantes (fig. 287) est porté par des tourillons comme une pièce d'artillerie sur son affût. Seu-

lement les tourillons y sont creux et servent, l'un de lumière d'admission pour la vapeur, l'autre d'échappement. D'ailleurs la distribution y est réglée par un tiroir comme dans les machines ordinaires. On distingue les machines oscillantes en

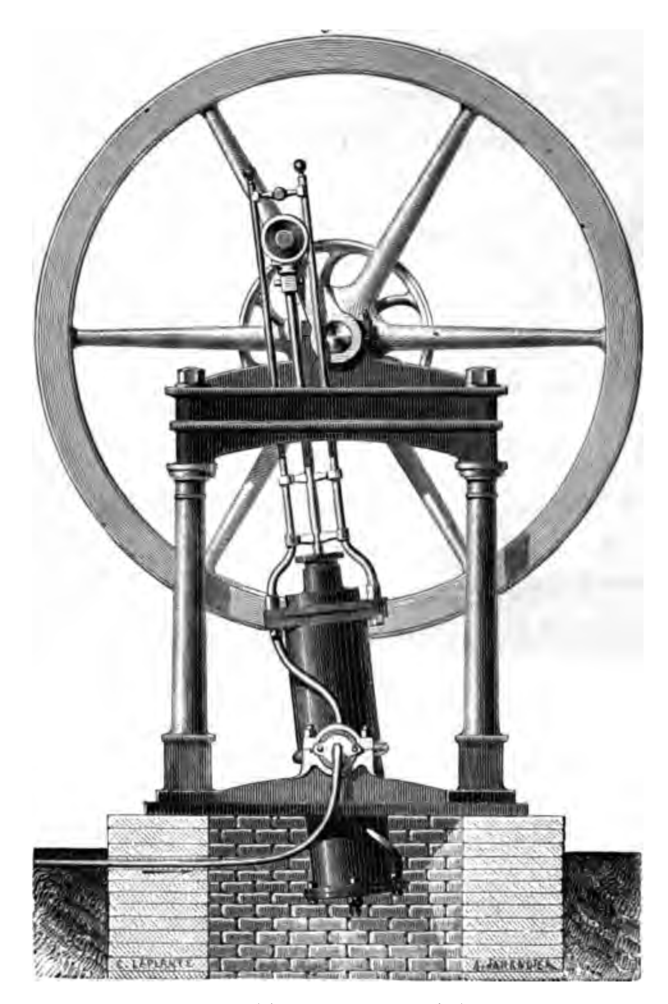


Fig. 287. — Machine à vapeur à cylindre oscillant.

horizontales et en *verticales*, suivant la direction moyenne du cylindre dans ses oscillations successives.

Ce genre de machines est aujourd'hui à peu près abandonné par l'industrie, sauf dans la navigation, où l'on rencontre souvent encore les machines à deux cylindres oscillants, sur les petits bateaux à vapeur.

§ 3. MACHINES A VAPEUR ROTATIVES.

Il nous reste encore, avant d'étudier les machines à vapeur au point de vue des types, à parler d'une espèce de machine qui se distingue de toutes celles que nous avons passées en revue jusqu'ici par le principe même du mécanisme. Je veux parler des *machines à vapeur rotatives*, ainsi nommées parce que la pièce sur laquelle la vapeur agit directement, celle qui correspond au piston des machines à cylindre, reçoit un mouvement qui est immédiatement circulaire et continu. Le problème de la transformation du mouvement n'existe donc pas dans ces machines.

L'idée de résoudre de cette façon la question des moteurs à vapeur n'est pas nouvelle. Elle était venue à Watt dès 1782; mais les inconvénients de cette disposition n'ont pas permis à la grande industrie de donner suite aux essais tentés dans cette voie : aujourd'hui même, malgré les perfectionnements apportés à la construction des machines rotatives, ce n'est que dans des cas très spéciaux que l'industrie en fait usage.

Nous ne ferons que citer la *machine rotative à disque*, imaginée par Bishop et construite par Rennie[1]. L'intelligence du mécanisme, très ingénieux, mais d'une description difficile à suivre, même à l'aide d'une figure, nécessiterait de trop longs développements. Disons seulement qu'elle a été adoptée, dans la marine russe, pour des canonnières et de petits bateaux à vapeur à hélice.

La machine à vapeur rotative de l'Américain Behrens, que nous avons vue fonctionner à Paris, à l'Exposition universelle de 1867, est beaucoup plus simple, au moins pour la description. La figure 288 en donne une vue extérieure. Voici maintenant comment elle fonctionne et quelle est la disposition du mécanisme moteur et de la distribution.

1. Voyez à ce sujet le *Dictionnaire des mathématiques appliquées* de Sonnet.

Sur deux arbres parallèles C, C′ (fig. 289), sont montées deux pièces en forme de portions de couronnes, l'une et l'autre concentriques à l'arbre correspondant, et fixées par l'une de leurs extrémités à un épaulement de ce dernier. Ces pièces jouent le

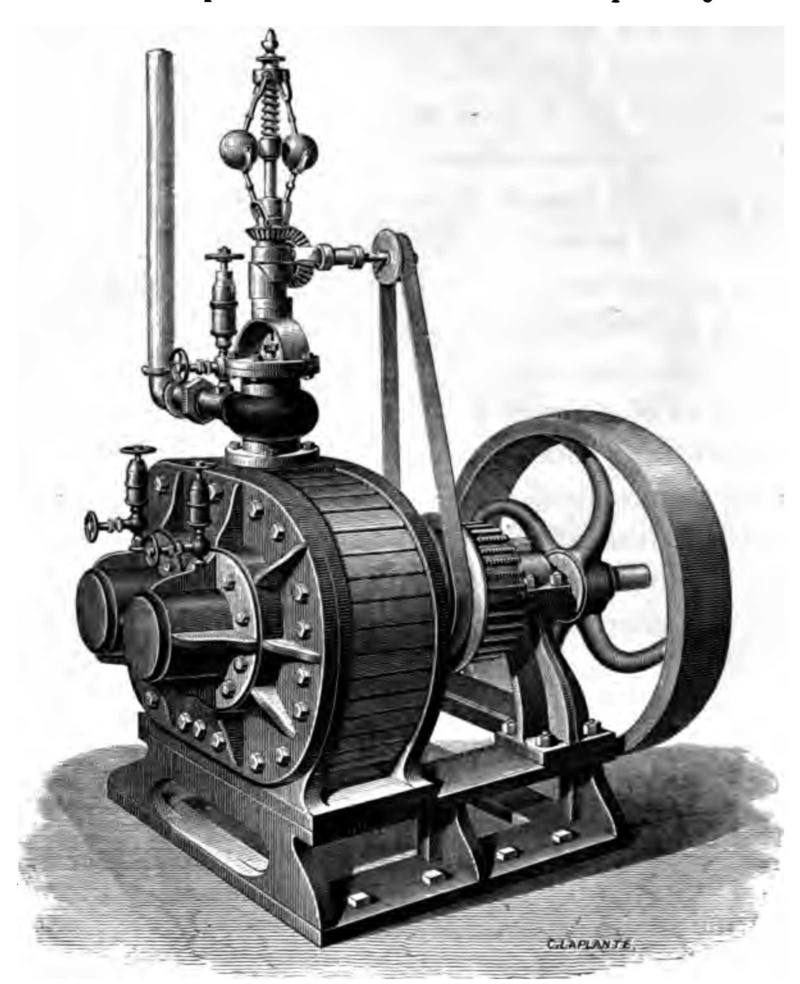


Fig. 288. — Machine rotative de Behrens.

rôle du piston des machines ordinaires. Leurs faces extérieures et convexes s'emboîtent dans un cylindre AA parfaitement alésé, et leurs faces inférieures et concaves se meuvent autour de deux douilles *c*, *c′*, concentriques à l'arbre. La forme des différentes pièces est calculée de telle sorte que chacun des pistons, dans son mouvement, vient s'engager dans une entaille

concentrique à son arbre de rotation, pratiquée dans la douille fixe de l'autre piston. Il résulte de cette disposition que jamais la vapeur ne peut passer entre l'un des pistons et la douille de l'autre.

Voyons maintenant comment agit la vapeur.

Elle arrive par le tuyau d'admission B de la chaudière, pénètre dans l'espace compris entre les deux pistons et la douille *c*. Elle pousse, en s'appuyant sur la face convexe de E', la face

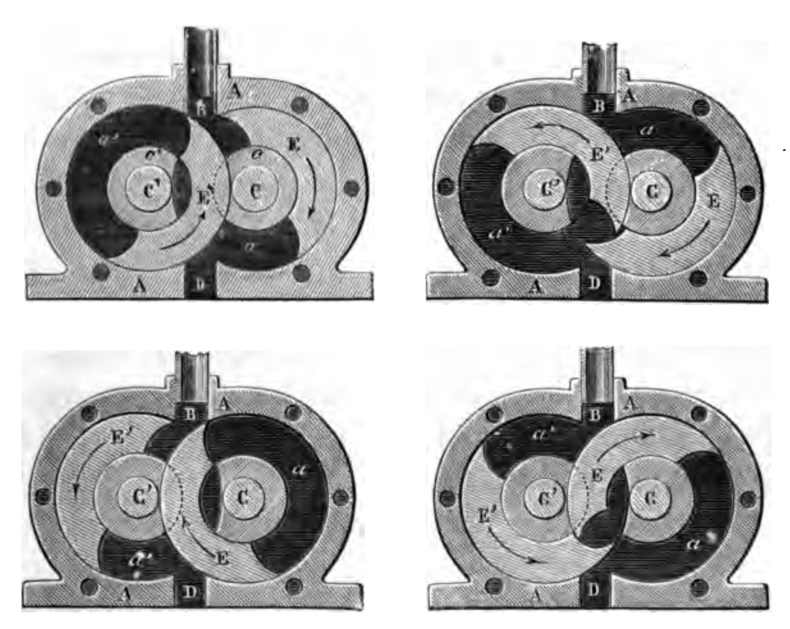


Fig. 289. — Machine rotative; phases d'un mouvement complet de rotation.

concave du piston E, fait tourner ce piston et son arbre dans le sens marqué par la flèche. Comme les deux arbres portent extérieurement des engrenages destinés à les faire tourner en sens inverse et avec la même vitesse, l'arbre C' et son piston se meuvent en sens contraire du premier.

Le deuxième et le troisième dessin de la figure 289 montrent la disposition des pièces après un quart, puis après une moitié de révolution. A ce moment, le piston E vient masquer l'ouverture B; la vapeur ne peut plus agir sur ce piston, mais elle commence à agir sur l'autre. Avant que commence le troi-

sième quart de la rotation (phase 4), l'ouverture de la lumière d'échappement D est démasquée, la vapeur de l'espace *a* s'échappe, le piston E continue à être entraîné dans son mouvement par l'autre arbre et par sa vitesse acquise, et ainsi de suite. La vapeur agit donc sur chaque piston pendant un peu plus de la moitié d'un tour, et alternativement chacun des arbres reçoit son mouvement de la vapeur même et de l'autre arbre avec lequel il engrène. L'un des deux arbres est l'arbre moteur de la machine; on le munit d'un volant. La machine rotative de Behrens est, comme on voit, une machine à vapeur sans détente et sans condensation. Mais il est possible, à l'aide d'une valve convenablement disposée, de la faire fonctionner avec détente.

Nous avons signalé déjà (Monde Physique, t. I, p. 441) une des applications originales de cette machine, qui consiste à l'employer comme moteur d'une pompe construite sur le même principe et fonctionnant de la même manière. Aux États-Unis, elle sert dans les brasseries et dans les raffineries, comme pompe élévatoire des liquides, eau, bière, sirops, etc. L'usage en est peu répandu en Europe, mais il paraît constant que cette machine a une véritable valeur industrielle.

§ 4. PUISSANCE DES MACHINES A VAPEUR.

Telle est la machine à vapeur moderne, dans son ensemble et dans les détails principaux de son organisme.

En résumant en quelques lignes la description qui a été l'objet des trois ou quatre chapitres précédents, on voit que la machine à vapeur consiste :

1° En une chaudière ou *générateur à vapeur*, qui transforme en force élastique disponible la puissance contenue dans un combustible, la houille par exemple. La chaleur est l'agent de cette transformation; elle passe du foyer aux parois qui constituent la *surface de chauffe* de la chaudière, et, se commu-

niquant de la fonte à l'eau, elle en élève la température, en provoque et en maintient l'ébullition, fournissant d'une façon continue au réservoir de vapeur la masse gazeuse et élastique, à une pression en rapport avec le travail à produire. Foyer, grille, cendrier, carneaux et cheminée, bouilleurs et corps de la chaudière, soupapes et avertisseurs de sûreté, manomètres, indicateurs de niveau et de pression, tel est le *générateur* de la machine, avec ses accessoires.

2° La vapeur produite, la machine proprement dite se compose des organes du mouvement, du récepteur de la force et des appareils de distribution ayant pour objet la production d'un mouvement alternatif rectiligne. Le cylindre, la boîte à vapeur, le tiroir, le condenseur, sont les principaux organes de cette partie de la machine. C'est le *mécanisme moteur*.

Enfin, 3° le mouvement une fois produit sous sa forme immédiate, il s'agit de le transformer, de le rendre apte au travail que l'industrie exige; et c'est le plus souvent sous forme de mouvement circulaire continu. Les bielles, manivelles, balanciers, glissières, sont les organes ordinairement employés pour cette partie de la machine, à laquelle on réserve le nom de *mécanisme de transmission*. Le volant et les régulateurs ont un objet particulier, qui est de maintenir dans les limites convenables la vitesse de régime ou la puissance du moteur.

Ces différentes fonctions bien comprises, les appareils qui les remplissent bien clairement conçus, au moins dans leurs dispositions principales, on peut, sans craindre de s'égarer, aborder l'examen des différents types de machines qui ont été imaginés depuis l'origine ou l'invention de la vapeur, et dont un grand nombre sont aujourd'hui employés dans l'industrie manufacturière, dans les voies ferrées et la navigation, et enfin dans l'agriculture. C'est ce que nous avons déjà fait pour les machines fixes. Avant de continuer cette revue des types, avant de montrer la vapeur à l'œuvre dans les services qu'elle rend à la navigation et à l'industrie des transports, il faut encore qu'on nous permette, non une digression, il s'agit d'une chose

essentielle, mais une courte explication de quelques termes et locutions fréquemment employés quand on parle des machines et qu'on évalue leur puissance.

Une machine *à basse pression* est celle où la vapeur possède une tension qui ne dépasse pas *une atmosphère et demie*. Une telle machine possède toujours un condenseur.

Quand la chaudière donne de la vapeur à une tension comprise entre *trois et cinq atmosphères*, la machine est une machine à vapeur *à moyenne pression*. On y adjoint le plus souvent un condenseur, mais cela n'est pas nécessaire.

Enfin, quand la tension de la vapeur dépasse *cinq atmosphères*, auquel cas la machine fonctionne généralement sans condenseur, on a affaire à une machine *à haute pression*.

Mais la puissance d'une machine ne dépend pas seulement de la force élastique de la vapeur qui sert à la mouvoir. Ce n'est là qu'un élément; il faut tenir compte, en partant de cet élément, des dimensions du cylindre, du nombre des coups de piston que la machine donne par minute ou par heure, nombre qui dépend lui-même de la quantité de vapeur régulièrement fournie par la chaudière. On arrive ainsi à évaluer le travail de la vapeur sur le piston. Mais ce travail, pour être transmis à l'arbre de couche et au volant, est en partie absorbé par les frottements et résistances des organes de transmission, de sorte qu'il y a lieu de le réduire d'après les données de l'expérience pour en conclure le travail réel, la puissance effective de la machine.

Ce travail s'évalue en *chevaux-vapeur*. On dit ainsi d'une machine qu'elle est une machine de 3, 4, 10, 50, 500 chevaux.

Avant d'aller plus loin, disons donc clairement ce que signifie cette expression de *cheval-vapeur*.

Un effort exercé s'évalue en kilogrammes : ce qui revient à dire qu'on assimile l'effet d'une force à celui d'un poids, par exemple à l'effet qu'un nombre donné de kilogrammes produit sur un ressort. Mais cela ne suffit point pour mesurer le travail effectué par un moteur quelconque, car ce travail dépend en-

core du temps nécessaire à son accomplissement, lequel dépend de la vitesse du mouvement produit. Pour achever de le définir, il faut dire quel chemin le moteur fait parcourir au poids pendant l'unité de temps, pendant une seconde. Nous avons vu qu'on nomme *kilogrammètre* le travail d'une force capable de transporter 1 kilogramme à une distance de 1 mètre en 1 seconde. Telle est l'unité de travail généralement adoptée par les mécaniciens.

Seulement, dans la pratique, et quand il s'agit du travail des machines, on emploie une autre unité, qui est 75 fois aussi grande que la première, qui vaut donc 75 kilogrammètres, et à laquelle l'usage applique la dénomination de *cheval-vapeur*.

Voici à quelle occasion cet usage s'est introduit.

Quand Watt eut apporté aux premières machines à vapeur les perfectionnements qui les firent adopter dans les mines et dans l'industrie anglaise, les fabricants de ces machines se virent dans l'obligation de garantir à ceux qui leur faisaient des commandes la puissance des nouveaux engins. Dans les mines, on employait généralement des chevaux qui faisaient tourner des manèges. Le travail journalier et moyen de ces animaux fut pris pour terme de comparaison, et l'estimation faite expérimentalement par Watt de ce travail, ou *horse-power*, servit à évaluer la puissance des machines livrées. On s'arrêta à un chiffre qui, traduit en mesures métriques, correspondait à 74 ou 76 kilogrammes transportés à 1 mètre. La moyenne, 75 kilogrammètres, a été définitivement adoptée en France, et est aujourd'hui universellement adoptée. Mais qu'on ne s'y trompe point. Le travail de la vapeur est supposé continu, et les machines travaillent des jours et des nuits sans se reposer. Une machine de la puissance d'un cheval fait donc, en un jour, c'est-à-dire en 86 400 secondes, un travail équivalant à 86 400 × 75 ou à 6 480 000 kilogrammètres. Un cheval vivant et réel, au contraire, est dans la nécessité de se reposer ; en le faisant travailler huit heures par jour, il ne développerait qu'un travail trois fois inférieur à celui de la même machine.

En réalité, c'est encore là une évaluation trop forte. Les chiffres de Watt, si l'on juge par les expériences faites depuis, s'appliquaient à des chevaux dont la vigueur dépassait la moyenne, et qui probablement étaient surmenés. Il résulte des expériences auxquelles nous venons de faire allusion, qu'un cheval de force ordinaire, attelé à un manège, allant au pas, développe une force égale à 40 kilogrammètres et demi, ce qui, pour une journée de huit heures, donne 1166400 kilogrammètres.

On voit donc, par la comparaison des deux chiffres relatifs au travail de la machine et à celui de l'animal, qu'en réalité, pour remplacer une machine dont la puissance est d'un *cheval-vapeur*, il faudrait employer à faire tourner, sans discontinuité, un manège donnant le même travail, un peu plus de *cinq chevaux et demi*.

Ce qui constitue la puissance d'une chaudière, c'est la quantité ou le poids de vapeur qu'elle est capable de produire en une heure, quand elle est en plein fonctionnement. Or c'est surtout de la surface de chauffe que dépend cette quantité; de sorte que, toutes choses égales d'ailleurs, c'est le générateur qui offre au foyer et au gaz de la combustion la plus grande étendue de surface de chauffe, qui est le plus puissant.

Quant à la consommation du charbon, elle est évidemment en rapport avec la surface de chauffe; mais elle varie d'une machine à l'autre, selon le type de la machine, suivant qu'elle est à haute, à basse ou à moyenne pression, suivant enfin qu'elle fonctionne avec ou sans condenseur, avec ou sans détente. Voici à ce sujet quelques données de l'expérience.

La pratique a fait reconnaître qu'il faut compter, pour chaque cheval-vapeur, une surface de chauffe variant entre 1 mètre carré et 1 mètre carré et demi. Une machine à vapeur de la force de 10 chevaux doit donc avoir un générateur ayant entre 10 et 15 mètres carrés de surface de chauffe. La quantité de vapeur produite par heure est alors en moyenne de 20 kilogrammes par cheval, de sorte que la chaudière d'une machine

de 10 chevaux doit pouvoir vaporiser par heure 200 kilogrammes, soit environ 200 litres d'eau.

Quant à la consommation de la houille par heure et par cheval, elle varie, avons-nous dit, avec les machines. Les machines de Watt, à basse pression, consomment de 5 à 6 kilogrammes de houille; celles de Woolff, 3 kilogrammes; les machines à haute pression, à détente et sans condenseur, consomment de 4 à 5 kilogrammes par force de cheval et par heure. Ce sont les moins économiques, mais elles rachètent ce défaut par des avantages que nous aurons occasion de signaler plus loin.

Un mot maintenant sur la puissance d'une machine dans son rapport avec les dimensions du cylindre et avec la vitesse du piston, ou, ce qui revient au même, avec le nombre des coups de piston par minute ou par heure.

La pression de la vapeur étant connue par la lecture du manomètre, comment calculera-t-on le travail qu'effectue le piston pendant sa course dans le cylindre? Prenons un exemple qui fera comprendre à la fois la question et la réponse qu'on doit y faire. Supposons une pression de 4 atmosphères dans une machine à condensation, ou de 5 atmosphères dans une machine dépourvue de condenseur. L'effort exercé par la vapeur sur le piston sera le même en réalité dans les deux cas, puisque dans le second la pression atmosphérique s'exerce sur la face du piston opposée à celle où s'exerce la force élastique du fluide. C'est donc, sur chaque centimètre carré de la surface, 1033 kilogrammes multiplié par 4, qui mesurera l'effort de la vapeur. Autant la surface du piston contient de centimètres carrés, autant il faudra répéter de fois ce résultat. Mais ceci ne donne pas le travail mécanique, qui sera d'autant plus grand que la longueur du cylindre ou la course du piston sera plus grande. Pour avoir ce travail en kilogrammètres, il faut encore multiplier le résultat précédent par cette longueur, de sorte qu' [illegible] la règle suivante :

[illegible] iston par sa course exprimée en

mètres, par la pression effective de la vapeur et par 1033, et vous aurez le nombre de kilogrammètres qui mesure le travail effectué par le piston dans sa course. Mais la surface multipliée par la longueur du cylindre, c'est le volume de ce dernier.

Ainsi, le travail est proportionnel et à la pression de la vapeur et au volume du cylindre. Supposons, dans le cas que nous prenons pour exemple, le diamètre du cylindre égal à 40 centimètres, sa longueur égale à 40 centimètres, le travail d'une course du piston sera : $\pi . 20^2 \times 40 \times 1033 \times 4$, ou $207^{kgm},40$. Un coup de piston se composant de deux courses, ce sera 415 kilogrammètres pour chaque coup.

Ceci ne donne le travail de la machine que pour un va-et-vient du piston, de sorte qu'il faut connaître encore le nombre de ces mouvements par minute ou par heure, pour évaluer définitivement en chevaux-vapeur la puissance de la machine.

Cette vitesse du piston est très variable. Mais elle ne dépasse guère soixante coups par minute, soit un coup par seconde. S'il s'agissait de cette vitesse maximum, la puissance de la machine serait précisément 415 kilogrammètres par seconde, ou 5,53, un peu plus de 5 chevaux et demi. Supposons quarante-quatre coups de piston par minute, cela fera en tout 18 278 kilogrammètres, c'est-à-dire 304 kilogrammètres par seconde, ou presque exactement une puissance de 4 chevaux-vapeur.

§ 5. APERÇU HISTORIQUE SUR LA MACHINE A VAPEUR.

Les premières machines à vapeur réellement employées dans l'industrie furent celles de Savery (1696-1698). Le principe en a été donné par Papin, puisque, comme le dit Arago : « Papin est le premier qui ait songé à combiner, dans une même machine à feu, l'action de la force élastique de la vapeur avec la propriété dont cette vapeur jouit, et qu'il a signalée, de se condenser par refroidissement. » Le dessin de la machine élévatoire de Savery, que reproduit la figure 290 dans ses

dispositions essentielles, montre que cet ingénieur produisait la vapeur dans un vase séparé B (c'est la chaudière). Le fluide remplissait d'abord le vase S et le tuyau A, dont il chassait l'air. Fermant alors le robinet C, et ouvrant le robinet *e* d'un réservoir E plein d'eau froide, il produisait la condensation de la vapeur du vase S ; le vide se faisait, et l'eau du réservoir R montait et remplissait en partie le vase et le tuyau. Un jet de vapeur, venant alors de la chaudière et pressant sur la surface du liquide, le forçait à s'élever à une hauteur qui dépendait de la pression. Puis survenait une condensation nouvelle, une nouvelle action de la vapeur, et ainsi indéfiniment.

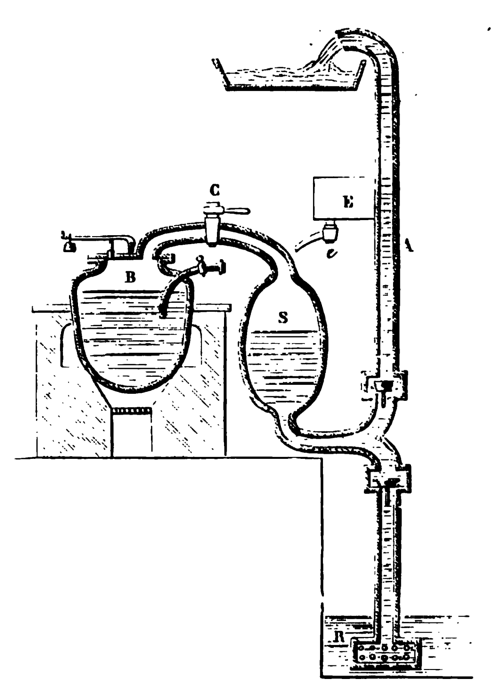


Fig. 290. — Machine à vapeur de Savery.

« Pour élever l'eau à la petite hauteur de 65 mètres (deux cents pieds), par exemple, Savery était forcé, dit Arago, de porter la vapeur de sa chaudière à 6 atmosphères : de là des dérangements continuels dans les joints ; de là aussi la fonte des mastics et même de dangereuses explosions. Aussi, malgré le titre de son ouvrage, *l'Ami du mineur* (*Miner's Friend*), les machines de cet ingénieur ne servirent point utilement dans les mines. Elles ne furent employées que pour distribuer l'eau dans les diverses parties des palais ou des maisons de plaisanee, dans des parcs ou dans des jardins, partout, en un mot, où la différence de niveau à franchir ne surpassait pas une quarantaine de pieds. »

La machine de Savery, comme on voit, utilisait la force

élastique de la vapeur pour refouler l'eau directement, et la condensation de cette vapeur pour produire le vide et l'ascension de l'eau sous l'action de la pression atmosphérique. C'était une sorte de pompe aspirante et foulante, où l'action de la vapeur jouait le rôle de la force musculaire appliquée au jeu du piston dans le cylindre de ces appareils hydrauliques. Elle n'est donc point comparable à la machine à vapeur moderne, telle que nous la connaissons.

Quatorze ou quinze années après la tentative de Papin, l'ingénieur anglais Savery s'associa à deux de ses compatriotes, Thomas Newcomen et John Cawley, tous les deux vivant dans la ville de Darmouth en Devonshire, où ils exerçaient, le premier la profession de forgeron ou de quincaillier, le second l'état de vitrier. De cette association naquit la machine à vapeur connue sous le nom de Newcomen ou de *machine atmosphérique*.

Disons rapidement quel était, dans cette machine (fig. 291), le mode d'action de la vapeur.

La chaudière fournit de la vapeur à une pression un peu supérieure à la pression atmosphérique. Au moment de la mise en train, le piston étant à la partie supérieure du cylindre, la vapeur remplit ce dernier, en chasse l'air par un orifice V auquel on donne le nom de *reniflard*. Alors on ouvre le robinet du tuyau LO, et de l'eau froide, injectée dans le cylindre, y condense la vapeur; le robinet fermé, la pression extérieure agit sur le piston et le fait descendre au bas du cylindre.

A ce moment, un tiroir débouche la communication du cylindre avec la chaudière, de sorte que la vapeur, en dessous, et la pression atmosphérique au-dessus du piston, se font équilibre. Le piston resterait donc dans cette situation, si un contrepoids I, lié au balancier de la machine, ne le forçait à remonter à la partie supérieure du cylindre. Une nouvelle condensation le fait redescendre, et ainsi de suite : le mouvement de va-et-vient est produit.

On voit maintenant la raison de la dénomination de *machine*

atmosphérique donnée à la machine de Newcomen : c'est la pression de l'air extérieur qui est le moteur; la vapeur n'intervient que pour lui faire équilibre pendant l'ascension du piston. Pendant la descente, la condensation de la vapeur produit le vide, et c'est encore la pression de l'air qui fait descendre le piston.

Les machines atmosphériques étaient surtout employées comme machines d'épuisement de l'eau des mines. Elles ont été également appliquées à la distribution des eaux dans la ville de Londres. Malgré les immenses perfectionnements apportés pendant un siècle et demi aux moteurs qui ont la vapeur pour agent, il paraît que les machines de Newcomen étaient il y a quelque temps et sont peut-être aujourd'hui encore employées dans les lieux où la houille coûte peu de chose.

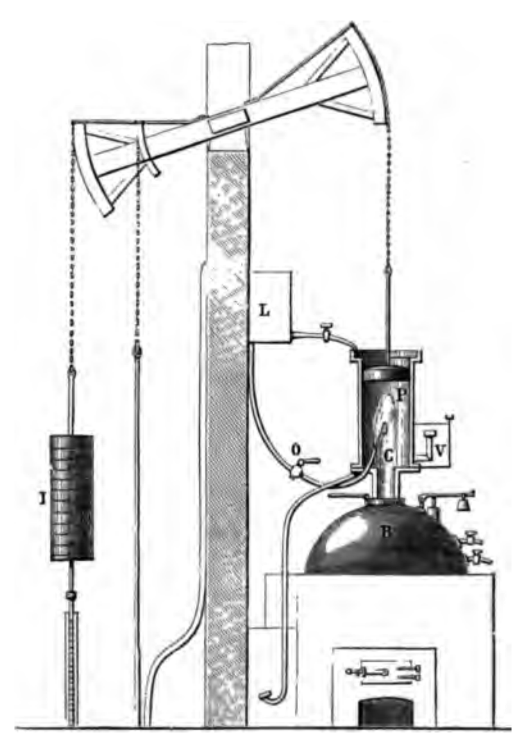


Fig. 291. — Machine à vapeur atmosphérique de Newcomen.

La machine à vapeur, sauf quelques perfectionnements de détail, resta ce que l'avaient faite Newcomen, Savery et Cawley, jusqu'en 1769. Soixante-quatre ans s'écoulèrent donc ainsi, infructueusement pour ainsi dire, jusqu'à ce que le génie de Watt, secondé par les progrès rapides des sciences physiques dans ce demi-siècle, en fît le puissant moteur, l'incomparable engin dont nous avons donné la description, en choisissant précisément pour type la machine à balancier, qui porte encore aujourd'hui le nom de Watt.

§ 6. WATT ET LA MACHINE A VAPEUR.

On vient de voir que les machines de Newcomen étaient de simples pompes, d'excellents engins à la vérité pour épuiser l'eau des mines, mais non pas de vrais moteurs universels, capables de fournir, pour les besoins d'une usine quelconque, un mouvement régulier et constant. La raison en est simple. La pression de l'atmosphère qui agit pour produire le mouvement descendant du piston est la vraie force motrice de ces machines, qui n'ont aucune puissance effective pendant la course ascendante : c'est tout ce qu'il fallait pour le jeu des pompes qu'elles faisaient mouvoir ; c'eût été un grave inconvénient pour une machine motrice, qui ne doit avoir aucune intermittence d'action.

Les machines atmosphériques étaient donc des machines *à simple effet*. Watt les transforma d'abord en machines *à double effet*. Il supprima l'action de l'atmosphère, et lui substitua, dans les deux phases du mouvement, l'action de la vapeur. Le cylindre ouvert par en haut fut remplacé par le cylindre fermé à ses deux bouts, divisé par le piston en deux capacités distinctes où la vapeur pénètre alternativement et où elle est alternativement condensée.

Ainsi fut créée la vraie machine à vapeur, celle où le fluide élastique est le véritable moteur, cause unique du mouvement. Les oscillations du piston communiquent alors au balancier des oscillations d'égale force, d'égale amplitude. En un mot, avec le double effet, la machine à vapeur devint un moteur universel, applicable à toutes les industries.

D'ailleurs Watt, en universalisant l'emploi de la machine à vapeur, ouvrait par cela même la porte à tous les perfectionnements. Lui-même consacra toutes ses forces, toute son intelligence, à cette tâche si ardue à l'origine. Par l'invention du *gouverneur* (c'est le nom anglais, *governor*, du régulateur à force centrifuge), il réduisit encore les inégalités du mouve-

ment. « L'efficacité du régulateur est telle, dit Arago dans sa Notice biographique sur Watt, qu'on voyait, il y a peu d'années, à Manchester, dans la filature de coton d'un mécanicien de grand talent, M. Lee, une pendule mise en action par la machine à vapeur de l'établissement, et qui marchait sans trop de désavantage à côté d'une pendule ordinaire à ressort. Le



Fig. 292. — James Watt.

régulateur de Watt et un emploi bien entendu des volants, voilà le secret véritable de l'étonnant perfectionnement des produits industriels de notre époque, voilà ce qui donne aujourd'hui à la machine à vapeur une marche totalement exempte de saccades ; voilà pourquoi elle peut, avec le même succès, broder des mousselines et forger des ancres, tisser les étoffes les plus délicates et communiquer un mouvement rapide aux pesantes meules d'un moulin à farine. Ceci explique encore

comment Watt avait dit, sans craindre le reproche d'exagération, que pour éviter les allées et les venues des domestiques, il se ferait apporter les tisanes, en cas de maladie, par des engins dépendants de la machine à vapeur. »

L'invention du condenseur séparé, des pompes qui y sont adjointes, fut d'une importance capitale, principalement au point de vue de l'économie. A égalité d'effet, elle réduisit au quart la dépense de combustible des machines de Newcomen. On peut se rendre compte de la valeur des économies réalisées dès le début dans les pays des mines, où les machines d'épuisement fonctionnaient, et depuis dans toutes les usines où la vapeur est employée à basse et à moyenne pression, par le fait suivant, que les historiens de la vapeur ont souvent cité. Trois pompes étaient en activité dans la mine de Chace-Water, dont les propriétaires payaient à Watt et à son associé Bolton une redevance pour le droit de se servir du condenseur. Cette redevance avait été fixée au tiers de la valeur de la houille économisée. Or les propriétaires de la mine jugèrent avantageux de racheter ces droits par le payement d'une somme annuelle de 60000 francs. Ainsi, l'adjonction d'un condenseur de Watt produisait par an, pour chacune des machines, une économie de combustible supérieure à 60000 francs, plus de 180000 francs pour les trois machines de la mine en question.

L'emploi de la détente, que Watt avait signalé, mais qui n'a été adopté sur une large échelle que depuis l'invention faite par Woolff des machines à deux cylindres, a accru encore l'économie de vapeur, et, par suite, l'économie de combustible, ce *desideratum* poursuivi par tous ceux qui travaillent à perfectionner la machine à vapeur. A l'origine, on ne connaissait que la détente fixe; aujourd'hui, des mécanismes nouveaux permettent de faire varier la détente.

Pour être juste, il ne faut pas, dans l'histoire des perfectionnements de la machine à vapeur, se borner à citer le nom de Watt. C'est Keane Fitzgerald (1758) qui s'est le premier servi du volant pour régulariser le mouvement de rotation;

l'emploi des bielles et manivelles pour transformer en mouvement de rotation le mouvement rectiligne et oscillatoire de la tige du piston est dû à Washbrough (1778). Enfin, Murray (1801) est l'inventeur du tiroir manœuvré par un excentrique. Du reste, en décrivant les machines à vapeur marines, les locomotives et les locomobiles, nous complèterons incessamment, autant que possible, c'est-à-dire dans ses principales phases, cette courte histoire des progrès de la vapeur.

CHAPITRE X

LA NAVIGATION A VAPEUR

§ 1. LES MACHINES MARINES.

Cent deux années s'écoulent entre la première application véritablement industrielle de la machine à vapeur et l'installation définitive du puissant engin à bord du bateau auquel il sert de moteur, entre Newcomen et Fulton.

Et cependant, ni l'idée première, ni les tentatives d'exécution n'avaient fait défaut.

C'est encore à Papin qu'il faut remonter pour trouver nettement formulée la pensée mère de cette application qui devait, un siècle plus tard, prendre des développements si considérables. Dès 1695[1], il signale la possibilité d'appliquer la force de la vapeur « à ramer contre le vent »; il fait remarquer « combien cette force serait préférable à celle des galériens pour aller vite en mer »; il songe à substituer aux rames ordinaires « des rames tournantes »; il s'ingénie à trouver un mécanisme pour obtenir le mouvement continu de rotation.

Bien plus, il paraît établi qu'en 1707 Papin avait mis à exécution cette pensée, ce projet d'abord simplement indiqué, et fait construire et installer sur un bateau une machine à vapeur destinée à le mouvoir. Il se serait embarqué à Cassel, sur la rivière Fulda, et, arrivé à Münden (Hanovre), il se pro-

1. Recueil imprimé à Cassel, extrait des *Acta eruditorum* de Leipzig.

posait de continuer sa route par le Weser jusque dans la Grande-Bretagne, quand les bateliers de ce fleuve, ameutés contre le grand inventeur et contre l'invention qui leur semblait menacer leur industrie, mirent le bateau et la machine en pièces.

En 1737, un Anglais, J. Hull, proposait de remplacer les rames par deux roues à palettes placées à l'arrière du bâti-



Fig. 293. — Fulton.

ment, et de faire tourner leur axe en commun avec une machine de Newcomen. Ce projet ne reçut pas d'exécution.

C'est à Paris, sur la Seine, vis-à-vis du Champ de Mars, qu'eut lieu, après celle de Papin, la première expérience de navigation à vapeur. Le bateau avait été construit par le comte d'Auxiron. Un an après, en 1775, un savant qui devint membre de l'Académie des sciences, Périer, fit sans plus de succès des expériences semblables.

De nouveaux essais, de plus en plus heureux, se succédèrent jusqu'à la fin du siècle. En 1778, le marquis de Jouffroy expérimenta un bateau à vapeur à Baume-les-Dames, sur le Doubs, puis, trois ans plus tard, à Lyon, sur la Saône. Dans cette dernière tentative, qui fut l'objet d'un rapport très favorable, il s'agissait d'un bateau de 46 mètres de longueur sur 4 mètres et demi de largeur; une machine à vapeur atmosphérique communiquait d'abord le mouvement à deux sortes de volets se fermant et s'ouvrant alternativement, et qui furent ensuite remplacés par deux roues à aubes. Le nom de Jouffroy mérite donc d'être associé à celui de Fulton dans la réalisation pratique de la navigation à vapeur.

Il faut citer encore, parmi ceux qui ont contribué à réaliser l'invention et l'idée de Papin, Patrick Miller, qui publia à Édimbourg (1787) un ouvrage sur la substitution des roues à palettes aux rames, et sur la possibilité d'employer la machine à vapeur à leur donner le mouvement. Miller fit plus tard l'essai d'un bateau double muni d'une roue au milieu, et le fit, dit-on, naviguer sur les lacs de la Suisse, en 1789.

L'abbé Darnal en France (1781), les Américains Rumsay et Fish (1786-1788), les Anglais lord Stanhope (1795), Baldwin (1796), Livingstone (1798), Desblancs, Smington, Stevins, Olivier Evans, ont également fait des essais de navigation à vapeur, qui se multiplièrent du reste de plus en plus en Europe et en Amérique, jusqu'à l'époque où l'Américain Fulton put enfin obtenir une réussite complète.

Fulton avait, dès 1802 et 1803, étudié en France les conditions pratiques du problème à résoudre, et il avait été secondé dans cette vue par son compatriote Livingstone, alors ambassadeur des États-Unis. Un bateau construit sur la Seine avait donné pour résultat une vitesse de $1^{m},60$ par seconde.

Fulton fit au gouvernement de Bonaparte des propositions qui ne furent point accueillies, et dont le rejet le décida à retourner en Amérique. Il se fit construire et expédier, par Watt et Bolton, une machine à vapeur qui, mise en place en

août 1807, sur le bateau *le Clermont*, fournit enfin la solution pratique et définitive du problème de la navigation à vapeur. Le voyage de New-York à Albany, dont la distance est de 60 lieues, fut, dès le début, accompli en 32 heures, puis en 30 heures, et un service régulier ne tarda point à s'établir entre ces deux villes. La navigation à vapeur était décidément passée de l'état d'ébauche à l'état de fait accompli, de la période des tâtonnements et des essais à celle du succès et du triomphe. Il y a de cela soixante-seize ans sonnés.

Aujourd'hui, la distance est grande entre le bateau de Fulton et les grands steamers transatlantiques qui voyagent régulièrement du nouveau à l'ancien monde. Les progrès de la navigation à vapeur pendant ces deux tiers de siècle ont été immenses : mais il ne faut point oublier la part qui revient à chacun des inventeurs qui ont travaillé sans se décourager à cette découverte mémorable, depuis le modeste Papin jusqu'à Jouffroy et à Fulton.

§ 2. LES BATEAUX ET NAVIRES A VAPEUR A AUBES.

Quand la vapeur fut découverte, il y avait longtemps que l'idée de remplacer les rames des bateaux par des roues que ferait tourner l'action musculaire des animaux ou de l'homme avait été conçue et même essayée. Les Romains et les Carthaginois s'étaient déjà servis de bateaux mus par des roues à aubes. D'anciennes médailles représentaient des *liburnes* (navires employés par les Romains à Actium) portant sur les côtés trois paires de roues à palettes tournées par trois paires de bœufs. Je lis dans l'*Art naval*[1] de M. Renard que « l'on trouve en Chine, où elles sont en usage depuis des temps immémoriaux, des jonques à quatre roues, dont le moteur est une ingénieuse manivelle mise en mouvement par des hommes ». En 1472, Valturius de Rimini décrivait une roue dont l'arbre était mû,

1. Bibliothèque des merveilles

au moyen de manivelles coudées, par des hommes, et dont les palettes remplaçaient les rames. Un propulseur semblable était proposé, en 1699, par du Quet, à l'Académie des sciences de Paris. Quand, quelques années plus tôt, Papin propose d'appliquer la vapeur aux bateaux, il fait mention des roues à rames de la chaloupe du prince palatin Rupertus, qu'il avait vues en 1678 en Angleterre : ces roues étaient mues par des chevaux attelés à un manège.

Ce mode de propulsion ne devait être sérieusement adopté qu'après la découverte et l'application d'un moteur puissant : on vient de voir que ce moteur est la vapeur. Ce n'est donc que depuis Fulton que les rivières, les lacs et la mer sont sillonnés de navires et de bateaux armés de roues à aubes.

Tout le monde sait ce que c'est qu'une roue à aubes : ceux qui n'ont pas vu de bateaux à vapeur ont pu observer des roues analogues dans les moulins de nos rivières.

Les *aubes*, *palettes* ou *pales*, qui rayonnent tout autour de l'axe, reliées solidement à celui-ci par des tiges ou jantes de fer (voy. plus loin la figure 299), sont des lames rectangulaires qui, mises en mouvement par la rotation de l'arbre moteur, viennent successivement plonger dans l'eau, et, s'appuyant sur la masse liquide, font avancer le bateau en sens contraire de leur propre mouvement. Les roues sont toujours, pour la symétrie et l'équilibre, au nombre de deux ; elles sont montées sur le même arbre ou axe, qui traverse le navire perpendiculairement à sa longueur; et quand elles plongent dans l'eau verticalement, leur bord supérieur doit être recouvert par le fluide d'une hauteur de $0^m,10$ à $0^m,20$.

Il en est du travail mécanique des aubes sur l'eau comme de celui des rames : il ne produit un effet utile, c'est-à-dire la propulsion du bateau en avant, que parce qu'il donne lieu à un mouvement de l'eau en arrière; ce dernier mouvement, sans lequel le premier, qui en est la réaction, n'existerait pas, se nomme le *recul;* il absorbe une quantité considérable du travail de la vapeur, indépendamment des pertes occasionnées

par le frottement. Comme exemple de cette répartition du travail moteur, nous citerons celui que donne M. Sonnet[1]; il est déduit d'expériences faites sur le bateau à vapeur *le Castor*, qui fait le service de Honfleur au Havre. « Sur 100 chevaux-vapeur fournis par la machine, dit-il, il y en a 33,9 employés à vaincre la résistance de l'eau sur la carène, c'est ce qui constitue le travail utile ; 58,2 sont consommés par le recul, c'est-à-dire pour mettre l'eau en mouvement ; le frottement n'en emploie que 7,9.

Le choc successif des palettes sur le liquide, à leur entrée et à leur sortie, produit sur le navire une suite de trépidations gênantes et fatigantes, qu'on réduit beaucoup en donnant aux palettes, dans le sens de leur longueur, une inclinaison légère. Alors une extrémité plonge avant l'autre, ou, si l'on veut, l'immersion est successive sur toute la longueur de la palette. Par ce moyen, le choc et les trépidations qui en sont la conséquence sont presque insensibles.

Sur les eaux dont la surface n'est point agitée, où les bateaux peuvent conserver une position presque horizontale d'équilibre, les roues à aubes font un service excellent. Mais il n'en est pas de même sur mer, où l'action du roulis fait pencher le navire de droite à gauche, et où cette inclinaison empêche l'axe des roues de rester horizontal. Les deux roues plongent alors inégalement dans l'eau, de sorte que l'action de chacune d'elles sur le liquide et sur le mouvement de propulsion devient inégale. Il en résulte, pour la direction du navire, une déviation fâcheuse et aussi une perte de force et de vitesse. Je parle ici du principal inconvénient des roues à aubes, de celui qui affecte la marche des navires de toutes sortes. Mais, dans la marine militaire, les roues à aubes offrent un inconvénient plus grave encore : elles réduisent la puissance offensive en prenant une place que l'artillerie réclame ; elles réduisent la puissance défensive en exposant le propulseur et le moteur lui-même au feu de l'ennemi.

1. *Dictionnaire des mathématiques appliquées.*

Il est résulté de là que la transformation de la marine militaire à voiles en marine à vapeur a été retardée, jusqu'au moment où l'invention d'un propulseur nouveau, qui n'est sujet à aucun des deux inconvénients que nous venons de signaler, rendit possible une large application de la vapeur aux flottes de guerre. Ce nouveau propulseur est l'*hélice*, qui, comme les roues à aubes, la vapeur même, et beaucoup d'autres inventions mécaniques ou physiques, etc., a été l'objet d'une série assez nombreuse d'essais et de tâtonnements avant d'obtenir la véritable et décisive consécration du succès, la réalisation industrielle ou pratique.

§ 3. LES BATEAUX ET NAVIRES A VAPEUR A HÉLICE.

L'hélice n'est autre chose qu'une vis ou qu'un fragment de vis, laquelle, faisant corps avec le bateau, avance dans l'eau et entraîne celui-ci dans l'écrou mobile que constitue le fluide lui-même. Le mouvement de rotation des spires autour de l'axe du propulseur est produit par une machine à vapeur installée à bord du navire.

Tout ce que nous avons dit de l'action propulsive des roues à aubes est applicable à l'hélice. C'est aussi en s'appuyant sur l'eau, masse mobile, et en lui imprimant un mouvement en sens contraire de celui de la marche du bateau, que ce dernier mouvement se produit. Il est donc inévitable qu'il y ait une fraction notable du travail moteur perdue en pure perte. Les avantages de l'hélice comparée aux roues à aubes sont d'une autre nature ; mentionnons-les rapidement.

L'hélice est placée à l'arrière du navire, dans un cadre rectangulaire qui s'ouvre près de l'étambot (fig. 294). L'axe ou arbre moteur qui la porte est parallèle à la quille : il s'appuie par un bout contre la *butée*, sorte de massif solidement établi dans la cale ; à l'arrière, il traverse la coque dans une boîte à étoupe. La machine met cet arbre et l'hélice en mouvement.

soit directement par des manivelles ou coudes, soit indirectement par un engrenage.

Ce propulseur se trouve donc toujours immergé et à une profondeur telle, que les mouvements perturbateurs de la mer n'ont sur lui aucune action. Il n'est donc pas, comme les roues à aubes, sujet aux inégalités d'action de ces dernières. D'autre part, l'hélice est à peu près complètement à l'abri des projectiles, et il en est de même des machines qui la font mouvoir, puisqu'elles sont installées, comme l'hélice, dans les parties inférieures du navire. Enfin, et ces considérations ont surtout de l'intérêt pour la marine de guerre à vapeur : les batteries d'artillerie ne se trouvent nullement gênées par son installation.

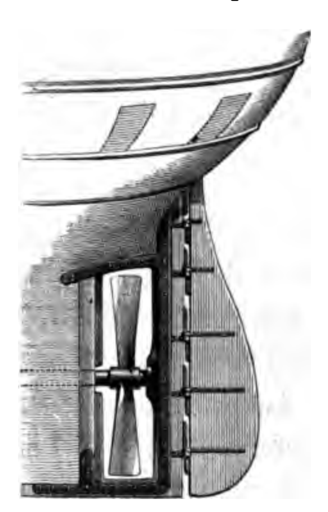


Fig. 294. — Cadre de l'hélice à l'arrière du navire.

En général, l'hélice offre sur les roues à aubes cette autre supériorité, que son installation laisse entièrement libre la manœuvre de la voile, de sorte que les navires à vapeur à hélice peuvent être gréés pour marcher sous l'action du vent quand ce dernier est favorable, ce qui est économiquement fort avantageux. Les navires mixtes, à voiles et à aubes, sont au contraire d'une manœuvre plus difficile.

En quelques lignes rapides traçons l'histoire de l'invention de l'hélice ou de son application à la navigation à vapeur.

Comme pour la roue à aubes, il a d'abord été question de faire mouvoir l'hélice par les moteurs animés, l'homme ou les animaux. Duquest (1727) utilisait le courant des fleuves pour remorquer les bateaux en se servant de la vis d'Archimède. Paucton (1768) employait une hélicoïde à quatre branches à laquelle il imprimait le mouvement par la puissance motrice des hommes d'équipage.

En 1803, l'ingénieur Dallery prit un brevet pour un pro-

pulseur mû par la vapeur et composé de deux vis : l'une à axe mobile, placée à l'avant, servait de gouvernail ; l'autre, placée à l'arrière, venait ajouter son impulsion à celle de la précédente, d'où résultait la progression du navire. Les noms des Anglais Shorter (1802), Samuel Brown (1825), du capitaine du génie français Delisle (1823), des frères Bourdon, de Sauvage (1832), doivent être cités au nombre de ceux qui ont conçu des projets ou fait des essais pour l'application de l'hélice à la propulsion des navires.

Deux hommes, le mécanicien anglais Smith, d'abord simple fermier, et l'ingénieur suédois Ericsson, peuvent être considérés comme ayant définitivement et presque simultanément résolu le problème.

L'*Archimède*, navire à vapeur de 90 chevaux, est le premier bâtiment qui ait navigué, sous l'action d'un propulseur hélicoïde du système de Smith, en 1838. Quatre ans plus tard, le *Princeton*, de 220 chevaux, muni d'une hélice système Ericsson, était lancé aux États-Unis.

Les premiers essais du Suédois Ericsson eurent lieu en Angleterre en 1837. Un navire, le *Francis B. Odgen*, muni de son propulseur, remorqua un schooner de 140 tonneaux avec une vitesse de 7 milles à l'heure. Mais Ericsson, n'ayant reçu des Anglais aucun encouragement, passa aux États-Unis, où son invention fut accueillie avec l'enthousiasme qu'elle méritait. Il s'était, avant son départ, entendu avec Stockton, officier de la marine des États-Unis, et c'est sur le *Robert Stockton*, navire à vapeur à hélice de 70 chevaux, qu'ils firent ensemble la traversée de l'Océan, et débarquèrent sur les côtes de la grande république. Le *Princeton* suivit de près ce premier navire, construit en Angleterre.

La France suivit, dès 1842, l'exemple donné par les deux grandes puissances maritimes. Un navire de 130 chevaux, pourvu d'une hélice système Ericsson, fut construit au Havre.

Depuis, la transformation des flottes en navires à vapeur à hélice fit dans le monde entier de grands progrès. Les navires

de commerce, les paquebots adoptèrent le nouveau système, sans toutefois que le propulseur à aubes, qui a aussi ses avantages, ait été abandonné. Ce n'est pas ici le lieu de faire l'histoire de ces changements. Revenons donc à la description des systèmes d'hélices adoptés, pour reprendre ensuite celle des machines à vapeur marines, qui doit nous intéresser particulièrement.



Fig. 295. — Premières hélices de Smith; hélice simple d'un pas entier ; hélice double d'un demi-pas.

Les premières hélices de Smith étaient formées d'un pas entier dans le sens de l'axe; plus tard il réduisit l'hélice à un demi-pas, mais il la doubla (fig. 295). L'expérience fit bientôt voir que l'étendue des spires dans le sens de l'axe pouvait et devait être considérablement réduite. On emploie donc des fractions de pas beaucoup plus petites, et l'on multiplie les branches ou ailes du propulseur, qui, le plus souvent cependant, sont réduites à quatre, quelquefois à deux (fig. 296).

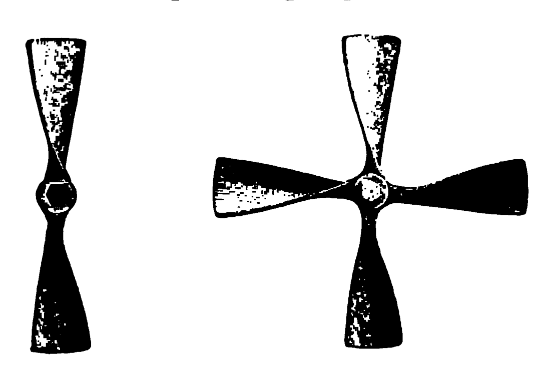


Fig. 296. — Hélices à deux et à quatre ailes.

L'emploi des hélices à six ailes ou plus offre plus d'inconvénients que d'avantages, l'action des unes nuisant à l'action des autres. C'est l'étendue ou le diamètre des ailes de l'hélice, c'est aussi la rapidité du mouvement de rotation, qui donnent à ce propulseur toute sa puissance.

Nous avons vu comment est disposée l'hélice dans son cadre, à l'arrière d'un navire; ajoutons que, pour éviter la résistance

qu'offrirait l'hélice au cas où le vent favorable remplace la vapeur, on s'arrange, soit pour la rendre *folle*, soit pour la retirer momentanément de son cadre. Dans ce dernier cas, un puits est ménagé dans l'arrière du bâtiment; on soulève l'hélice, qu'on amène, entre deux coulisses, dans le puits, où elle peut être visitée et réparée au besoin.

§ 4. LES CHAUDIÈRES ET LES MACHINES MARINES.

Le propulseur des navires ou des bateaux à vapeur nous est connu. Voyons maintenant comment la vapeur, la seule force motrice assez puissante pour suppléer à la force inconstante et souvent contraire du vent, imprime aux roues ou à l'hélice le mouvement de rotation.

La machine à vapeur, telle que nous l'avons décrite, est-elle modifiée d'une manière essentielle quand elle devient une machine de navigation? Non. En réalité, non seulement le principe est identique, mais les organes principaux, le générateur, le mécanisme moteur, la transmission restent les mêmes. Ils ne font, ainsi qu'on va le voir, que subir les nécessités particulières à l'installation sur un navire.

A l'origine, les machines à basse pression et à condensation, c'est-à-dire les machines de Watt à balancier, les seules d'ailleurs employées alors dans l'industrie, formaient le type des machines de navigation, soit sur les rivières et les lacs, soit sur la mer. Aujourd'hui encore, les vapeurs à aubes trouvent avantage à s'en servir. Les mouvements en sont lents, comme on sait, mais cette lenteur est largement compensée par la régularité du fonctionnement. Elles sont lourdes et encombrantes, il est vrai, mais toutes leurs parties sont aisément accessibles pour la surveillance, l'entretien, et au besoin pour les réparations. C'étaient les machines qu'avaient adoptées les marines militaires d'Angleterre et de France, avant que l'invention de l'hélice eût changé les données du problème. Pour

l'hélice, les machines de ce type donnent un mouvement trop peu rapide de rotation, qu'il serait sans doute aisé de multiplier par les engrenages, mais aux dépens de la force effective des machines ou de leur travail utile.

La condensation est généralement adoptée non seulement là où elle est nécessaire, c'est-à-dire dans les machines à basse pression, mais aussi dans les machines marines à moyenne et à haute pression. L'abondance de l'eau rend commode et économique l'emploi des condenseurs.

Les machines à vapeur employées dans la navigation sont les plus puissantes que l'on construise. Il n'est pas rare que leur force effective se mesure par centaines de chevaux-vapeur; que dis-je? dans certains navires de la marine militaire il faut compter par milliers. Ajoutons que l'évaluation de la puissance des machines en chevaux-vapeur — ce qu'on appelle leur force nominale — se fait d'une autre façon que pour les machines terrestres. Le *cheval de basse pression*, le *cheval nominal* dans la marine, vaut, non pas seulement 75, mais plus de 100 kilogrammètres, en moyenne 107 kilogrammètres sur l'arbre de couche, 135 kilogrammètres sur les pistons. Cela tient à ce que la perte de travail moteur employé au recul a forcé les constructeurs à exagérer la force en vue de l'effet utile à produire. Aujourd'hui même, les chiffres que nous venons de rapporter sont trop faibles : dans la marine de l'État, le cheval-vapeur *nominal* atteint 300 kilogrammètres. A ce compte, la frégate à vapeur *le Friedland*, dont la machine a une puissance effective de 4000 chevaux de 75 kilogrammètres, ne doit être portée, pour sa force nominale, qu'à 1000 chevaux. Pour obtenir une telle puissance, il a fallu employer des générateurs capables de vaporiser des poids d'eau considérables, ayant par suite une grande surface de chauffe.

Aussi emploie-t-on généralement des chaudières tubulaires à retour de flamme, dont les figures 271, 297 et 298 représentent plusieurs types. D'ailleurs, on ne se contente pas d'une seule chaudière, ni d'un seul foyer, et la quantité de com-

bustible brûlée s'élève à des proportions énormes. Citons à l'appui quelques chiffres :

L'*Algésiras*, de 900 chevaux, a une machine munie de huit corps de chaudières dont les foyers, quand ils sont allumés tous ensemble, brûlent par heure 4146 kilogrammes de houille.

Le *Napoléon*, de 950 chevaux, a aussi huit corps de chaudières, et quarante foyers qui brûlent 3635 kilogrammes de



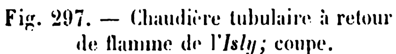


Fig. 297. — Chaudière tubulaire à retour de flamme de l'*Isly;* coupe.

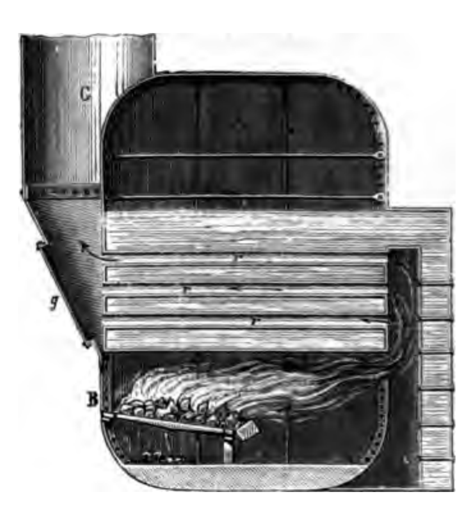


Fig. 298. — Chaudière tubulaire marine à retour de flamme ; coupe.

houille à l'heure. La pression de la vapeur n'y dépasse guère 2 atmosphères.

La frégate cuirassée *le Friedland*, qui, avec son chargement complet de charbon et de munitions, pèse 7200 tonnes, consomme, en pleine marche, 5200 kilogrammes de houille par heure, 125 tonnes de houille par jour de navigation continue. C'est donc une dépense qui, suivant les prix de la houille, peut varier de 4000 à 5000 francs par jour pour le combustible seul. L'aspect extérieur des chaudières et des machines marines ne rappelle guère celui des machines à vapeur employées dans l'industrie manufacturière. Quoique tous leurs organes

soient de dimensions relativement considérables, on les a disposés de manière à occuper le moins d'espace possible : chaudières, condenseurs, mécanisme moteur, etc., tout est ramassé, comme on peut s'en rendre compte en examinant les deux types de machines dont les figures 299 et 300 donnent l'ensemble général.

La première est une machine à balancier, à moyenne pression, à condensation et à détente. Le balancier se trouve

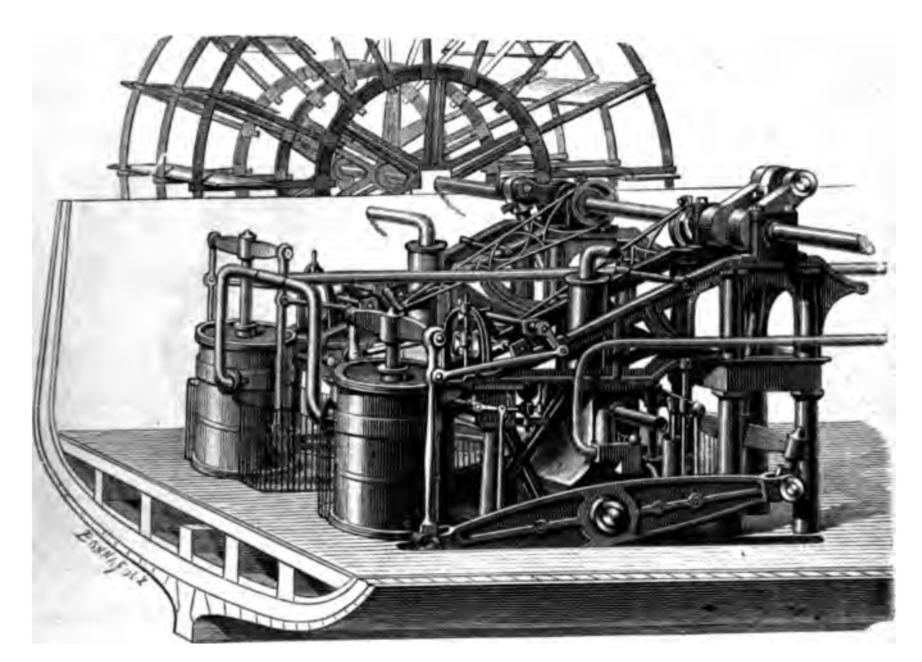


Fig. 299. — Machine à balancier du navire à aubes *le Sphinx*.

osciller au-dessous du piston et du cylindre : c'est une disposition rendue nécessaire par la situation de l'arbre moteur, ou de l'axe des roues du navire, qui occupe nécessairement une place élevée dans les navires à aubes. Cette machine appartient au navire à vapeur *le Sphinx*.

Les bielles sont reliées directement à l'arbre, qui est coudé en deux de ses points, de manière à former deux manivelles à angle droit, recevant chacune l'action d'un cylindre.

Ici les cylindres sont verticaux. Quand le même type de machines fut appliqué à l'hélice, les cylindres furent placés hori-

zontalement et dans un sens transversal ; mais on fut obligé, pour donner à l'arbre une vitesse de rotation suffisante, d'employer un système d'engrenage. Bientôt on préféra les machines horizontales, à deux cylindres, sans balancier, et c'est sur l'arbre même de l'hélice, coudé à angle droit, que les bielles exercèrent leur action.

Les cylindres des machines marines ont souvent des dimensions colossales. Pour ne citer qu'un exemple, les cylindres de la machine du *Friedland* ont un diamètre intérieur de 2^m,10,

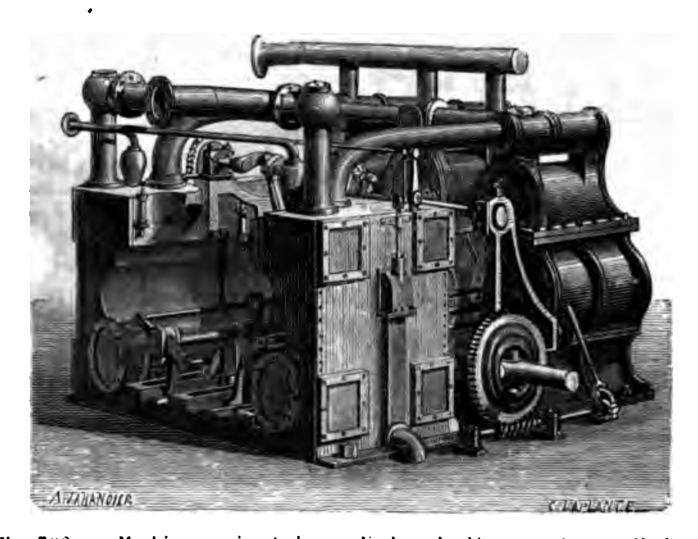


Fig. 300. — Machine marine à deux cylindres de détente et à un cylindre de pleine pression.

et la course de leurs pistons n'a pas moins de 1^m,30. La pression de la vapeur s'exerce ainsi, pour chaque piston, sur une surface d'environ 3^{mq},50 ; en supposant la tension de la vapeur de 2 atmosphères et demie, cette pression est donc égale à environ 90 000 kilogrammes.

Pour guider des pistons de cette dimension, on emploie, non plus une seule, mais deux ou quatre tiges qui s'articulent par une traverse à la bielle. Celle-ci revient sur elle-même s'articuler au coude de l'arbre moteur, faisant fonction de manivelle, et, pour cette raison, on la nomme *bielle en retour*.

La machine à vapeur marine que nous venons de citer n'est

pas seulement remarquable par ses dimensions, par sa puissance, par la vitesse qu'elle imprime au navire sur lequel elle est installée, vitesse qui n'est pas moindre, par un temps calme, de 14 nœuds et demi, c'est-à-dire d'environ 28 kilomètres à l'heure. Son hélice a $6^m,10$ de diamètre. Nous l'avons vue tourner sur son arbre à l'Exposition universelle de 1867; en se plaçant dans le sens du mouvement des ailes, on ressentait sur la figure l'impression du courant d'air produit par l'évolution des énormes spires. Mais, je le répète, cette machine se distingue aussi comme un type ayant des qualités spéciales. Nous allons en dire, pour terminer, quelques mots.

C'est une machine à détente du système de Woolff, avec cette disposition particulière, qu'elle renferme trois cylindres égaux, de même diamètre et de même course. L'introduction de la vapeur a lieu dans un seul cylindre, celui du milieu; après avoir travaillé à pleine pression, elle pénètre dans les deux cylindres latéraux, où elle se détend, puis se rend de là dans deux condenseurs séparés. En sortant des chaudières, la vapeur circule dans un appareil sécheur, puis elle se bifurque dans les chemises-enveloppes des cylindres extrêmes. A puissance égale, à poids égal des machines, on obtient avec ce système, comparé au système à deux cylindres, une économie notable de combustible.

De plus, comme les coudes ou manivelles de l'arbre moteur qui reçoivent les têtes de bielles sont disposés à angle droit relativement aux coudes correspondant aux pistons extrêmes, et dans le prolongement de la bissectrice de cet angle pour le coude du milieu, il en résulte cet avantage, que toutes les pièces mobiles conservent presque complètement le même équilibre autour de l'axe de l'arbre, quelle que soit la position du navire déterminée par le roulis.

Depuis quelques années, on emploie beaucoup dans la marine les machines Compound, qui ne sont autre chose que des machines à détente du système de Woolff à deux cylindres, mais où la distribution et l'agencement des cylindres sont com-

binés d'une façon spéciale. Il y en a trois systèmes particuliers, selon que les cylindres sont verticaux, les pistons agissant à l'extrémité d'un balancier, ou que les cylindres sont placés horizontalement bout à bout et les deux pistons enfilés sur une même tige; ou enfin que, comme dans la machine Dupuy de Lôme (du *Friedland*), il y ait trois cylindres dont les pistons agissent sur des manivelles à 90°. Les machines Compound ne sont d'ailleurs pas exclusivement employées dans la navigation à vapeur.

Les machines à fourreau, les machines oscillantes, que nous avons décrites dans le paragraphe consacré au mécanisme de transmission, sont souvent employées dans la navigation à vapeur fluviale ou maritime. Nous croyons avoir dit déjà que les premières étaient surtout en usage dans la marine anglaise. En général, les différences qu'on rencontre entre les machines fixes terrestres et les machines marines sont presque toutes dues aux modifications nécessitées par la question d'aménagement et d'emplacement.

CHAPITRE XI

LA LOCOMOTIVE

§ 1. LA VAPEUR SUR LES CHEMINS DE FER. — PREMIÈRES LOCOMOTIVES.

Les premiers essais de voitures mues par la vapeur d'eau remontent à l'ingénieur français Cugnot, qui, en 1769, conçut et fit exécuter à Paris un chariot destiné à se mouvoir sur les routes ordinaires, sous l'action de la vapeur. Vint plus tard Olivier Evans, qui construisit à Philadelphie, en 1804, la première voiture de ce genre qu'on ait vue en Amérique. A la même époque, une machine locomotive circula sur le chemin de fer de Merthyr Tydvil, en Angleterre : elle était due aux ingénieurs Trewitick et Vivian.

La locomotion sur les routes par l'action de la vapeur ne devait réussir et prendre l'immense extension qu'elle possède aujourd'hui, que grâce à l'adoption d'un nouveau système de voie, qui fut d'abord appliqué au transport des matériaux dans les mines de houille. Les chemins à ornières, puis à bandes saillantes, d'abord de bois, puis de fer ou d'acier, diminuaient considérablement la résistance au roulement.

Mais, chose curieuse, ce progrès constitua dans l'origine un obstacle à l'adoption des voitures à vapeur. Comme ces voitures étaient d'abord assez légères, leurs roues motrices, en tournant rapidement, glissaient sans avancer, *patinaient*, selon l'expression technique. On imagina divers moyens de vaincre cette difficulté pratique, quand un ingénieur anglais, Blacket (1813),

prouva que l'adhérence de la locomotive sur les rails peut s'obtenir en donnant aux locomotives un poids suffisamment considérable, pourvu qu'on fît supporter cette pression à l'essieu des roues motrices. C'est de cette époque que date la machine de G. Stephenson, où les essieux étaient rendus solidaires par le moyen d'une chaîne sans fin[1]. L'adhérence de toutes les roues de la locomotive se trouvait ainsi utilisée.

On peut dire qu'à partir de ce moment la locomotion sur les voies ferrées, à l'aide de voitures mues par la vapeur, était un problème pratiquement résolu. Toutefois les premières locomotives ne donnaient pas encore un résultat satisfaisant; la quantité de vapeur que leurs chaudières pouvaient fournir était insuffisante pour la charge ou la vitesse qu'on voulait obtenir.

La raison en était dans la nature de la chaudière, dont l'eau était chauffée par un foyer intérieur, dans un tube qui la traversait dans toute sa longueur. La surface de chauffe n'était pas assez considérable pour la vaporisation qu'il importait d'obtenir, et le tirage était tout à fait insuffisant.

Toutefois les locomotives de Stephenson, d'Hackworth, réalisèrent, sous divers rapports, des perfectionnements qui eurent leur importance : le mécanisme moteur, la transmission, l'adhérence des roues sur les rails, furent l'objet de dispositions nouvelles, qu'il serait trop long de décrire. Jusqu'en 1829 la locomotion à vapeur ne fit que les progrès de détail dont nous parlons.

Mais, à cette époque, la substitution à la chaudière ordinaire de la chaudière tubulaire, avec tirage produit par un jet de vapeur, produisit une véritable révolution dans l'application des machines à vapeur à la locomotion sur les voies ferrées. C'est à Marc Seguin qu'est due l'invention des chaudières tubulaires; grâce à l'accroissement énorme de surface de chauffe que cette disposition permit d'obtenir sans augmenter les di-

1. Par exemple, emploi d'une roue dentée s'engrenant avec une crémaillère disposée entre les rails, ou encore de jambes mobiles qui étaient alternativement appuyées sur le sol, puis soulevées.

mensions du générateur, la vaporisation se trouva accrue dans une proportion qui multiplia la puissance des machines; mais, pour suffire à cette production de vapeur, il fallait entretenir l'activité du foyer par un tirage énergique, que la très faible hauteur des cheminées de locomotive ne pouvait donner.

Ce fut donc aussi une invention heureuse que de faire servir la vapeur à ce but, quand elle vient d'agir sur le piston, en la laissant s'échapper dans la cheminée même. Elle produit ainsi, à chaque coup de piston, un courant rapide qui entraîne au dehors l'air et les gaz de la combustion, et par les tubes détermine un appel au sein même du foyer. Hackworth, Pelletier, G. Stephenson sont regardés comme les inventeurs de ce perfectionnement important, qui donna toute sa valeur à la chaudière tubulaire pour locomotives.

La première locomotive où ces deux capitales améliorations furent appliquées, fut la *Fusée*, qui sortit des ateliers de Robert Stephenson, et obtint en 1825 le prix du concours ouvert à Liverpool.

§ 2. LA LOCOMOTIVE.

Voyons maintenant ce qu'est devenue la locomotive, après soixante années de perfectionnements incessants.

Voici (fig. 301, 302 et 303) une coupe longitudinale, puis deux coupes transversales à l'avant et à l'arrière de la machine, qui nous feront comprendre les principales dispositions de la machine.

Occupons-nous d'abord du générateur. On vient de voir que la chaudière des locomotives est tubulaire. Elle est composée de deux parties principales : l'une, située à l'arrière et de forme rectangulaire, renferme le foyer, qui, sur toutes les faces sauf la face inférieure, est enveloppé d'eau; l'autre, le *corps cylindrique*, ainsi nommé de la forme de son enveloppe, contient deux capacités distinctes : dans sa moitié inférieure sont logés les tubes par lesquels passent la fumée et les gaz de

combustion qui du foyer vont à la cheminée. Tous ces tubes, en nombre souvent considérable, sont baignés par l'eau de la chaudière. La moitié supérieure du corps cylindrique est le réservoir de vapeur qui, par un tuyau doublement coudé à l'avant et à l'arrière, *pssu* (fig. 301), débouche d'un côté dans le dôme, de l'autre dans la boîte à vapeur de chacun des deux cylindres de la machine.

Le mécanicien peut à volonté, à l'aide de la manette *r*, ouvrir

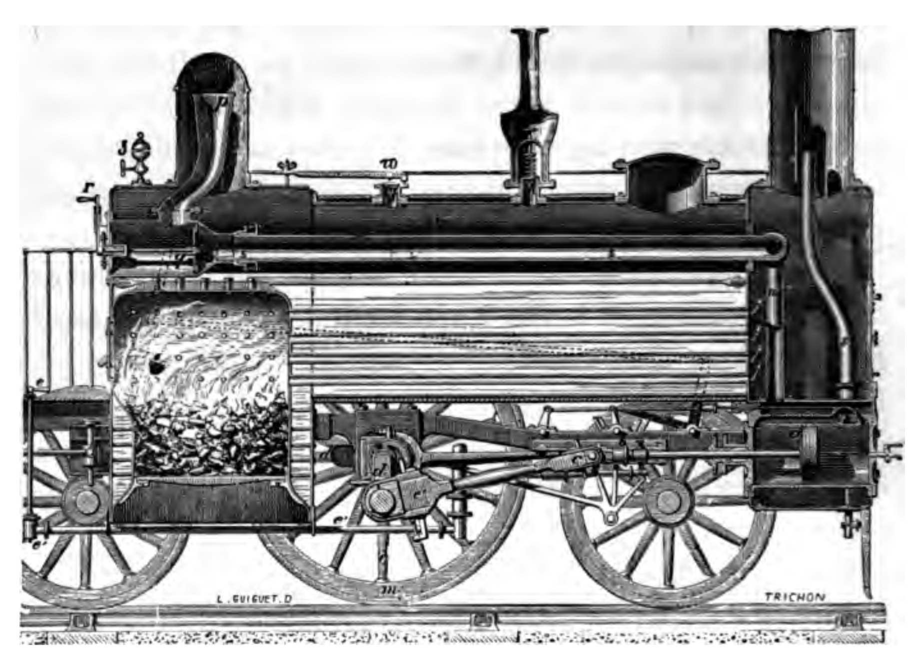


Fig. 301. — Locomotive; coupe longitudinale.

ou fermer les valves d'un diaphragme *q*, qui donne passage à la vapeur, l'arrête ou l'introduit en proportions variées : c'est ce qu'on nomme le régulateur, et ici, à cause de sa forme, le *régulateur à papillon*.

On voit sur le dos convexe du corps cylindrique les appareils accessoires ou de sûreté de toute machine à vapeur, soupapes, manomètre, indicateur de niveau, sifflet d'alarme.

Quel est le caractère distinctif de la chaudière d'une locomotive? C'est d'abord, nous l'avons déjà dit, l'énorme étendue de la surface de chauffe relativement à la capacité totale. Pour

montrer dans quelle proportion cet élement se trouve accru par l'adoption des tubes, citons quelques nombres. Dans une locomotive Crampton (type de l'Est), les enveloppes du foyer, c'est-à-dire la surface de chauffe par rayonnement, n'est, en mètres carrés, que de $8^{m},65$; la surface de chauffe par contact, c'est-à-dire celle des tubes que lèchent les gaz de la combustion, est de $88^{m},92$, ou, si l'on veut, plus de *dix fois aussi grande*. Dans une machine Engerth, à marchandises, ces

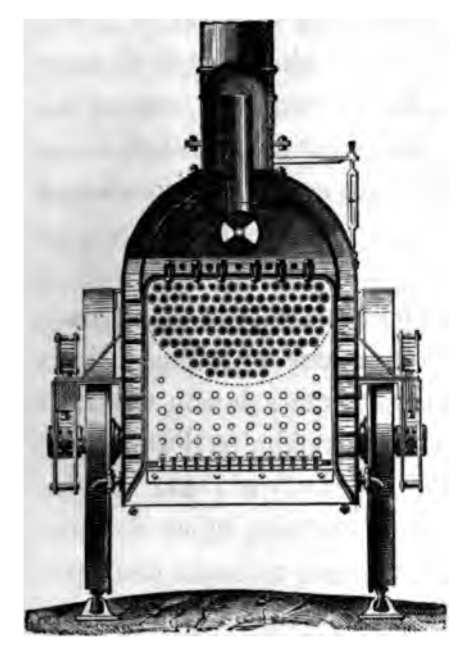




Fig. 302. — Locomotive; coupe transversale dans la boite à feu.

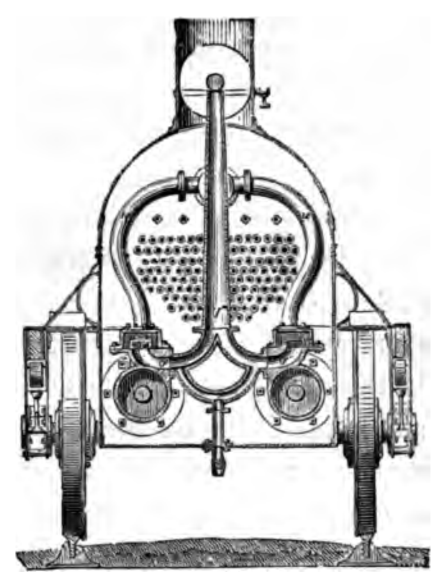


Fig. 303. — Locomotive; coupe transversale dans la boite à fumée.

nombres sont respectivement, $9^{m},70$, $180^{m},70$: les tubes augmentent la surface de chauffe dans le rapport de 1 à 18,6. De là, répétons-le, le second caractère important, le tirage par le jet de vapeur, sans lequel l'activité du foyer ne pourrait suffire à une si considérable production de vapeur, sans lequel, par conséquent, le type de la chaudière tubulaire pour locomotive perdrait son principal avantage. « Dans les machines locomotives, dit M. Perdonnet, le mètre carré de surface de chauffe produit de deux à trois fois autant de vapeur que dans les chaudières des machines fixes. »

Les locomotives sont des machines à haute pression, sans condensation. C'est là une conséquence nécessaire de ce que nous venons de dire. Il faut que la vapeur s'échappe dans l'atmosphère : elle ne peut donc être à basse pression; il faut qu'en s'échappant elle produise un jet ou courant; donc elle ne peut être condensée. Le plus souvent elle est employée avec une tension de 8 à 9 atmosphères.

Mais elle fonctionne avec détente, et un mécanisme particulier, la coulisse de Stephenson, permet de faire varier la détente, et en même temps rend possible le changement de sens dans la direction du mouvement. Une locomotive, comme un bateau à vapeur — on comprend aisément la nécessité d'une telle manœuvre — doit pouvoir marcher en arrière comme en avant.

Continuons notre description.

La locomotive est, en réalité, au point de vue du mécanisme moteur, formée de deux machines à vapeur accouplées. Il y a deux cylindres, munis chacun de son piston, de son tiroir, et la tige de chaque piston agit par l'intermédiaire d'une bielle sur la manivelle ou sur le coude de l'essieu qui porte la paire de roues motrices. Il y a même, dans certains types de locomotives, quatre cylindres, quatre machines agissant deux par deux, sur deux essieux différents. Rien de spécial, sauf dans l'agencement et les détails, ne distingue le mécanisme moteur de celui que nous avons vu fonctionner dans les machines fixes, terrestres ou marines. Les dessins que nous donnons montrent quelle est la disposition des cylindres ordinairement placés à l'avant, tantôt horizontaux, tantôt légèrement inclinés, tantôt logés hors du châssis qui porte chaudière et machine, tantôt intérieurs. Ici les cylindres sont intérieurs et horizontaux.

C'est ce que nos coupes longitudinales et transversales de la locomotive laissent voir clairement. Dans la figure 301, la distribution et l'échappement sont aisés à comprendre. La vapeur, qui est amenée par le tuyau *ss* jusque dans l'espace qu'on nomme boîte à fumée, trouve là deux conduits *u*, *u* qui

vont, en se contournant, aboutir aux boîtes à vapeur des deux cylindres. Après avoir agi sur les pistons, elle traverse les tuyaux *v*, *v'*, et par le tuyau vertical V, qui s'ouvre à la base de la cheminée, elle s'échappe en produisant le mugissement saccadé qu'on entend toujours dans les locomotives en marche.

La rapidité avec laquelle ces bruits produits par l'échappement se succèdent en pleine vitesse d'un train, indique assez combien est grand le nombre des coups de piston dans chaque cylindre. On peut calculer ce nombre d'après la vitesse de la locomotive. Dans les trains rapides, cette vitesse atteint 60 et même 80 kilomètres par heure ; en supposant cette distance parcourue par une locomotive à voyageurs (système Crampton) dont la roue motrice a $2^m,30$ de diamètre ou $7^m,20$ de développement, on trouve qu'en une heure la machine a fait 11 111 tours de roue, dont chacun correspond à une double course des pistons. C'est trois doubles courses, ou six courses simples par seconde.

§ 3. PRINCIPAUX TYPES DE LOCOMOTIVES.

Si la locomotive a un caractère spécial qui la distingue des autres machines à vapeur, des machines fixes de l'industrie, comme des machines mobiles de la navigation, il ne s'ensuit pas qu'elle constitue un type unique et uniforme. C'est un *genre ;* mais ce genre comprend des espèces et de nombreuses variétés. Ces espèces, dont nous ne pouvons décrire ici que les principales, ont été successivement créées pour satisfaire aux exigences multiples et croissantes des nouvelles voies de transport. Les locomotives se sont divisées d'abord en deux types bien tranchés :

Les *locomotives à voyageurs*, uniquement destinées au transport rapide des convois de faible masse : service de grande vitesse ;

Les *locomotives à marchandises*, spécialement consacrées

à mouvoir, à une vitesse modérée, les plus lourdes charges : service de petite vitesse.

Tout naturellement, un troisième type intermédiaire entre les deux premiers, participant de leurs qualités moyennes, a dû être créé. Ce sont :

Les *locomotives mixtes*, employées à traîner des convois renfermant à la fois des voitures à voyageurs et des wagons de marchandises ; ou encore, pouvant à volonté être affectées alternativement au service de la grande vitesse ou au service de la petite vitesse.

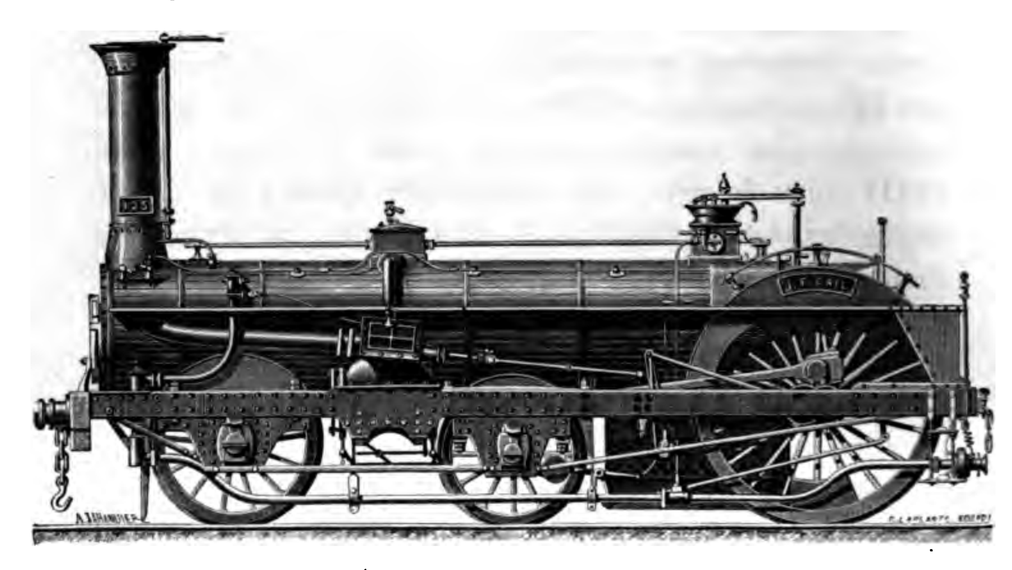


Fig. 304. — Machine à grande vitesse ; type Crampton.

En dehors de ces trois types principaux, d'autres types de locomotives ont été construits pour satisfaire à des services spéciaux. Nous allons passer en revue quelques échantillons des unes et des autres.

Voici le type par excellence (fig. 304) de la machine à voyageurs à grande vitesse. C'est la locomotive Crampton, caractérisée par le diamètre considérable de ses deux roues motrices, par la faible course du piston, deux conditions qui, jointes à une haute puissance de vaporisation, en font le cheval de course des voies ferrées. Depuis trente-cinq ans bientôt que

cette excellente machine est à l'épreuve, elle n'a pas cessé de répondre aux exigences du service. Elle jouit d'une grande stabilité, provenant de l'abaissement du centre de gravité général et de l'écartement des essieux. D'un poids moyen de 30000 kilogrammes, elle remorque des convois de 12 à 16 voitures pesant de 100 à 130 tonnes, avec une vitesse qui, stationnement compris, s'élève à 60 kilomètres à l'heure.

Une Crampton, sans son tender, coûte 65000 francs.

Les systèmes Mac-Connel, Buddicom, Sturrock, Stephenson à trois cylindres, sont aussi de bonnes machines à grande vitesse employées sur les chemins étrangers. Le troisième

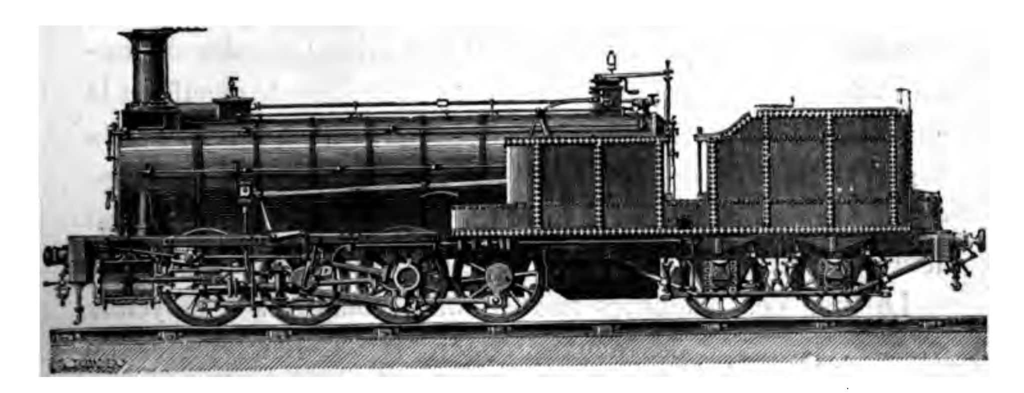


Fig. 305. — Locomotive à marchandises, petite vitesse; type Engerth.

cylindre de la machine Stephenson a pour objet d'obvier au mouvement de lacet que prend la locomotive sous l'action des deux pistons latéraux, et que ressentent toutes les voitures du train. On se rappelle que c'est aussi en partie pour un motif d'équilibre que M. Dupuy de Lôme a employé trois cylindres dans ses machines marines.

On peut prendre de même le type Engerth comme le plus tranché des machines locomotives à petite vitesse destinées à remorquer de lourds convois. A considérer seulement la physionomie extérieure, et à la mettre en parallèle avec une machine Crampton, on voit à l'instant qu'on a affaire à une puissante machine, et que si l'une peut être comparée à un cheval

de course, l'autre le sera non moins légitimement à un cheval de camion ou de halage.

La vitesse moyenne des Engerth (il y en a plusieurs variétés) est de 24 kilomètres à l'heure ; mais elles remorquent des convois de 450 tonnes. Leur poids atteint 63 tonnes, qui se répartissent en partie avec le poids du tender sur les roues de ce dernier, mais qui sont principalement supportées par quatre paires de roues d'égal diamètre, rendues solidaires par des bielles d'accouplement. Contrairement au type Crampton, les machines à marchandises de ce type ont donc plusieurs paires de roues motrices, de petit diamètre, et une longue course pour les pistons de leurs cylindres. Grande longueur de la chaudière, du corps cylindrique et des tubes, grandes dimensions du foyer. En un mot, c'est dans la surface de chauffe et la puissance de vaporisation de sa chaudière qu'est le secret de la force de traction dont est doué ce type remarquable. Les premières Engerth[1] étaient munies d'un système d'engrenage qui leur permettait de gravir les rampes du Sœmmering.

Le type des machines mixtes, ou locomotives à moyenne vitesse, participe des deux premiers types. Deux paires de roues couplées, d'un diamètre qui varie entre 1^{m},50 et 1^{m},70, moyenne longueur de la course du piston, poids de 25 à 30 tonnes, vitesse réglementaire de 45 kilomètres à l'heure, remorquage de 180 à 200 tonnes, tous ces éléments, comme on voit, sont compris entre les éléments correspondants des types extrêmes. Puis viennent des locomotives tantôt économiques et de faible puissance relative, tantôt coûteuses et compliquées, mais possédant une force de traction qui les rend capables de remorquer les plus lourdes charges, par les temps de brouillard et de pluie, et de gravir les fortes rampes aujourd'hui adoptées sur un grand nombre de voies ferrées nouvelles. Ces dernières machines, dont la figure 306 représente un modèle, sont dites *locomotives de montagne* ou *pour fortes rampes*.

1. Ainsi nommées du nom de l'inventeur, ingénieur autrichien, qui les destinait d'abord à la traction sur les lignes à fortes rampes.

Il faudrait, pour être complet, multiplier les descriptions et les figures, citer les *locomotives-tender*, qui font le service des gares ou servent de remorqueurs aux convois trop chargés; les *locomotives de secours*, expédiées sur les lignes en cas d'accident; puis les types des lignes étrangères, les locomotives des chemins d'Allemagne ou d'Amérique, chauffées au bois, et

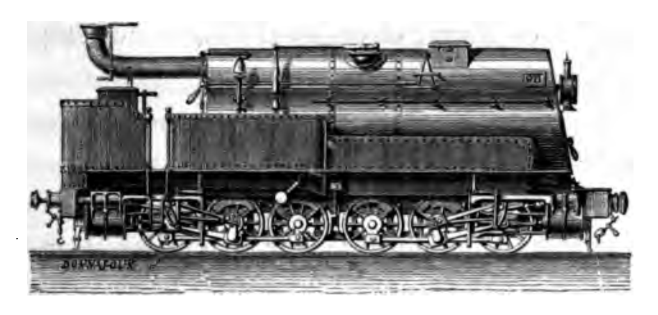


Fig. 306. — Machine à marchandises de la ligne du Nord, à douze roues couplées et à quatre cylindres.

auxquelles leurs avant-trains articulés, leurs chasse-bœufs, leurs cheminées largement évasées par le haut, donnent un aspect extérieur si original. Mais des détails aussi complets et aussi circonstanciés dépasseraient notre cadre. Nous renvoyons sur ce point à notre ouvrage sur *Les chemins de fer*[1].

§ 4. LES VOITURES A VAPEUR OU LOCOMOTIVES ROUTIÈRES.

Les premières voitures à vapeur ont été conçues, et essayées sur les routes ordinaires, avant l'invention des chemins de fer. On a vu qu'elles n'ont pu réussir. Les raisons de ces insuccès étaient multiples : les unes provenaient de l'imperfection relative des machines à vapeur employées à cet usage, et aussi des organes du mouvement; les autres résidaient dans la nature même de la voie sur laquelle les voitures devaient se mouvoir.

1. Deux volumes de la Bibliothèque des merveilles.

La puissance d'une locomotive se résume en quelque sorte dans son poids, bien qu'il soit erroné de croire à la nécessité d'augmenter le poids pour accroître l'adhérence. Les roues, les roues motrices surtout, supportent ce poids toujours considérable, et s'en déchargent sur la route même aux points où elles se trouvent en contact avec celle-ci. Or, quelque bien pierrée et entretenue que soit la route, le sol enfonce sous la pression, des ornières se creusent, et au bout de peu de temps les machines restent en route.

A Londres, en 1862, on a employé des locomotives du système Bray pour remorquer sur des routes ordinaires, macadamisées ou pavées, de lourds fardeaux, des trucs ou trains chargés de masses trop lourdes pour être mises en mouvement par des chevaux.

En 1864, on fit à Nantes des expériences avec une locomotive routière construite par un de nos habiles mécaniciens, M. Lotz. Au mois d'août de l'année suivante, ces expériences furent reprises à Paris et donnèrent des résultats intéressants. En voici la description, que nous empruntons au *Dictionnaire des sciences mathématiques appliquées*, de M. Sonnet :

« La machine de M. Lotz est de 5 chevaux-vapeur. Elle porte avec elle son tender. La chaudière est montée sur quatre roues; le train de devant est mobile autour d'une cheville-ouvrière, comme dans les voitures ordinaires. Tout le mécanisme est placé au-dessus de la chaudière et parfaitement visible. L'arbre moteur transmet le mouvement à l'une des roues de derrière par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin, engrenant avec une roue verticale solidaire avec l'essieu. La bande des roues de derrière a $0^{m},20$ de largeur : le constructeur a ainsi évité les ornières. Les roues sont montées sur ressorts, ce qui prévient les secousses brusques capables de fausser les bielles. Un homme assis sur le devant de la locomotive manœuvre les roues de devant et fait tourner le véhicule avec la plus grande facilité, à l'aide d'une petite roue verticale analogue à celle dont se sert le timonier à bord des navires. »

Avec une charge de 5 à 6 tonnes, la vitesse de la locomotive Lotz atteignait 16 kilomètres à l'heure sur une route en bon état d'entretien; elle remorquait de 12 à 15 tonnes avec une vitesse de 6 kilomètres, gravissant des pentes qui variaient de $0^m,7$ à $0^m,13$.

Un des inconvénients de ce mode de transport, ce sont les variations considérables des efforts à exercer par des moteurs dont la force doit être sensiblement constante. La locomotive routière Larmanjat répond à cette difficulté. Aux roues motrices de grand diamètre, marchant avec une vitesse de 16 kilomètres par exemple, on peut substituer rapidement deux roues de plus petit diamètre, solidaires et disposées à l'intérieur des premières. Cette substitution entraînant une diminution de la vitesse de la machine, vitesse réduite à moitié, j'imagine, la puissance de traction sera devenue double, et la locomotive pourra vaincre alors les obstacles que la pente ou le mauvais état de la route aura suscités dans le trajet. Une machine de ce système figurait, en 1867, à l'Exposition universelle; elle avait la force de 3 chevaux-vapeur. « Partie de la gare d'Auxerre, remorquant un lourd camion à basses roues, portant une charge de plus de 3000 kilogrammes, et ainsi



Fig. 307. — Locomotive routière; système Larmanjat.

chargée, au moyen de l'emploi de ses petites roues, elle a pu gravir une longue rampe de 0m,08 par mètre, avec une vitesse moyenne de 8 kilomètres à l'heure. » D'autres expériences, faites d'une manière continue aux environs de Paris, ont été, paraît-il, très favorables à ce système. La vue que nous donnons de la locomotive routière de M. Larmanjat a été dessinée d'après nature, à l'un des nombreux essais faits il y a une dizaine d'années à Paris, au Trocadéro.

Nous devons citer aussi la locomotive routière de M. Albaret, de Liancourt (Aisne), laquelle a été, pendant deux années, expérimentée dans les départements du Nord et du Jura, remorquant, sur dés routes dont les rampes atteignaient 0m,05 à 0m,06, des charges de 12 tonnes, à une vitesse maximum de 6 kilomètres à l'heure; celle de M. Garret, qui a remorqué, d'Auxerre à Avallon et retour, une diligence chargée de quinze personnes, à la vitesse moyenne de 11 kilomètres.

Les Anglais et les Américains ne sont pas restés en arrière dans cet ordre de recherches. Ils ont fait de nombreuses tentatives pour résoudre pratiquement la question de la locomotion à vapeur sur les routes ordinaires. Pour eux, comme pour nos ingénieurs et constructeurs français, la difficulté à vaincre était d'éviter les ornières occasionnées par le poids de la machine. C'est ainsi que, dans le système Boydell, on employait un rail sans fin venant se placer au-devant de la roue et reposant sur le sol au moyen de larges patins. La complication du mécanisme et la faible vitesse obtenue ont fait abandonner ce système. Le système Bray avait adopté des roues de fer de grandes dimensions, munies de griffes mobiles à leur circonférence; mais il résultait de là une détérioration rapide des routes.

Pour résoudre le même problème, un constructeur d'Édimbourg, M. Thomson, a imaginé de garnir les jantes des roues motrices de sa machine de bandes de caoutchouc vulcanisé qui ont une épaisseur de 0m,125, sur une largeur de 0m,30.

« Ces bandes supportent parfaitement le poids de la ma-

chine, et roulent sur les routes ordinaires sans écraser les pierres qui se trouvent à la surface. Grâce à l'élasticité du caoutchouc, le contact entre la jante et le sol n'a plus lieu suivant une génératrice, mais suivant une surface sur laquelle la pression se trouve répartie. Les roues ne s'enfoncent plus alors dans le sol, et même, si l'on fait circuler la locomotive sur une route nouvellement chargée, elle passera sur les pierres fraîchement cassées, sans que le bandage soit coupé ni détérioré. La force employée pour faire marcher une locomotive de ce genre sera donc de beaucoup inférieure à celle nécessaire pour une machine à bandages lisses de fer; car, dans ce dernier cas, la roue écrase le ballast et occasionne une perte de force notable[1]. »

Une locomotive de ce modèle a pu circuler dans une prairie sans laisser de fortes traces de son passage. Sur une route horizontale, elle peut remorquer 30 tonnes avec une vitesse variant de 4 à 10 kilomètres à l'heure. Sa force effective est de 16 à 18 chevaux. En Angleterre, on en emploie plusieurs au transport du charbon de la mine aux usines voisines; à Édimbourg, M. Thomson a appliqué sa locomotive à la traction des omnibus. Des essais enfin ont dû être faits aux Indes, par l'administration postale, pour le transport de ses dépêches dans la province du Pundjab, entre les villes de Loodlana, Ferozepore et Lahore.

Le dessin que nous donnons ici, de la locomotive routière Thomson, suffira pour faire comprendre la disposition générale des organes. On voit que la machine à vapeur est une machine à cylindre horizontal C, communiquant le mouvement par une bielle à un arbre moteur doublement coudé, muni d'un pignon en rapport avec une roue d'engrenage calée sur la roue motrice. Grâce à cette disposition, le mouvement est donné à l'essieu R des roues motrices de la voiture avec une vitesse qui, pour une même vitesse des pistons, dépend des

1. Article de M. Sauvée dans les *Annales industrielles*, excellente revue à laquelle nous empruntons le dessin de la locomotive routière Thomson.

nombre des dents de la roue et du pignon. Mais l'arbre moteur est muni d'un second pignon qui engrène avec une seconde roue calée elle-même sur un autre arbre moteur parallèle au premier, et ce dernier, par un troisième pignon, communique son mouvement à la première roue d'engrenage. Il est bien entendu que ces deux systèmes fonctionnent isolément : le conducteur passe

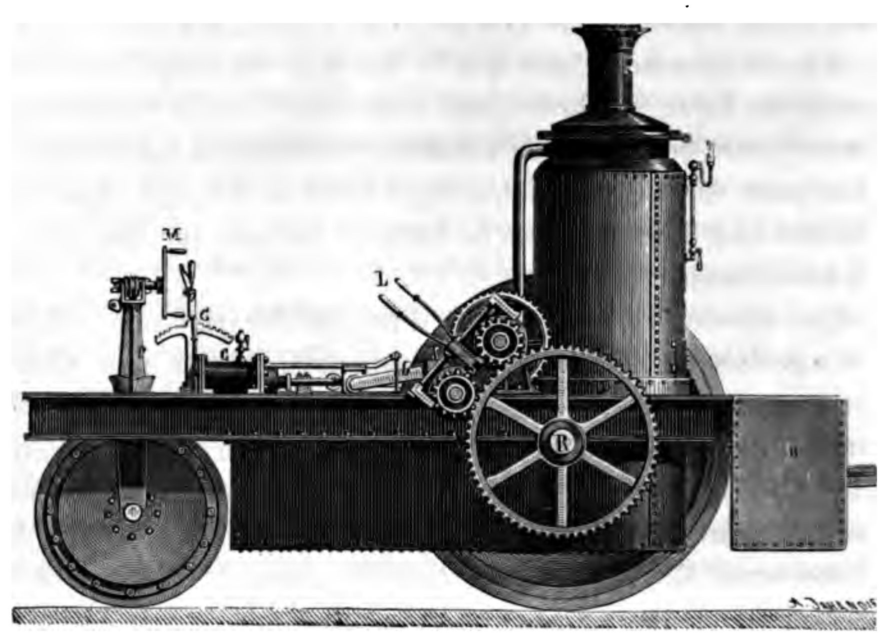


Fig. 308. — Locomotive routière; système Thomson.

à volonté de l'un à l'autre à l'aide de leviers de manœuvre L à sa portée. Il peut ainsi faire varier, pour une même action de la vapeur, la vitesse des roues motrices dans un rapport qui varie du simple au double (plus exactement de 16 à 39)[1].

1. Le problème mécanique de la locomotion à vapeur sur les routes ordinaires peut être, comme on le voit, considéré comme résolu. Cela veut-il dire que l'emploi des locomotives routières se généralisera promptement? Il est difficile de répondre à cette question; car, à côté du point de vue technique, il y a le point de vue industriel et commercial. Il faut que ce mode de transport soit réellement économique, et cela dépend évidemment d'une foule de circonstances étrangères à la pure mécanique. Dans les grandes villes comme Paris, Londres, où les besoins de la circulation sont si continus et si pressants, les locomotives routières pourront être utilement employées, si l'on imagine des moyens qui rendent cet emploi prudent, si l'on pare aux dangers que la rencontre fréquente des voitures et des piétons multiplierait à chaque instant. Ce mode de locomotion a été essayé, mais abandonné sur l'une des grandes voies que l'édilité parisienne a fait établir sous le nom de *tramways*.

§ 5. LA LOCOMOBILE.

Il nous reste à examiner un quatrième type de machines à vapeur récemment créé, dont l'usage se multiplie de plus en plus, et qui n'a guère de ressemblance avec la locomotive que le nom et l'apparence extérieure. C'est la *locomobile*.

En réalité, la locomobile est une machine fixe, mais une machine fixe transportable ; elle fonctionne au repos, mais le lieu de son action peut être changé promptement et à volonté. Relativement légère et peu encombrante, elle est disposée comme la locomotive sur un châssis et montée sur des roues : chaudière, mécanisme moteur, volant, tout est réuni de manière à fonctionner sans aucune mise en train, si ce n'est celle de l'alimentation et de l'allumage. La machine a-t-elle achevé son service en un point, on la conduit ailleurs, là où se fait sentir le besoin de la force motrice, qu'elle dispense ainsi successivement en des lieux éloignés les uns des autres. Les roues de la locomobile ne sont pas, comme dans la locomotive, des roues motrices ; elles sont absolument indépendantes du mécanisme et n'ont qu'un objet : rendre facile le transport de la machine sur les routes ou à travers les champs. A l'aide d'un ou deux chevaux attelés au limon, c'est la chose du monde la plus simple.

La locomobile est aujourd'hui un moteur universellement employé. Dans l'agriculture, dans les constructions industrielles, les locomobiles servent à une foule d'usages et remplacent avec avantage les moteurs animés.

Dans les ateliers de maçonnerie d'une certaine importance, ce sont des locomobiles qu'on emploie à hisser les matériaux ; elles donnent le mouvement aux monte-charges ; elles font tourner les moulins à broyer, à fabriquer le mortier ; elles sont substituées aux ouvriers qui soulèvent les moutons des sonnettes ou qui manœuvrent les grues. Les grues à vapeur mues par des locomobiles se voient fréquemment aujourd'hui dans

nos ports marchands ou militaires. Les bateaux-dragueurs en sont pourvus.

On emploie les locomobiles au mouvement des pompes établies provisoirement pour l'épuisement des terrains de construction. En agriculture, c'est le moteur adopté aujourd'hui dans tous les cas où s'introduit l'usage de l'action de la vapeur. Ainsi dans les opérations agricoles proprement dites, notamment le labourage, c'est une locomobile qui, installée à l'une des extrémités de la pièce de terre, communique le mouvement aux engins qui portent les socs de la charrue. De même dans les opérations d'industrie agricole qui ont pour objet les produits, leur manutention, transformation, etc., machines à battre, hache-paille, concasseurs, pressoirs, coupe-racines. Partout où l'on agit sur de grandes masses, il peut y avoir, et il y a en effet avantage à substituer aux moteurs animés ordinaires, aux hommes et aux animaux, le moteur par excellence, la vapeur.

Les locomobiles sont des machines qui ont reçu, suivant leur destination et l'inspiration des constructeurs, des formes extrêmement variées. Il nous suffira de décrire l'un des types adoptés pour faire comprendre le mécanisme de tous les autres. Prenons la locomobile Calla pour exemple.

La chaudière est, comme dans la locomotive, une chaudière tubulaire composée d'un foyer A situé à l'arrière, et du corps cylindrique BB, qui renferme les tubes. La puissance des locomobiles étant faible (on en construit de 1 et 2 chevaux, jusqu'à 8 chevaux), il n'y a pas nécessité d'une aussi grande surface de chauffe que dans les locomotives; aussi les tubes sont-ils plus gros et moins nombreux.

La machine est à haute pression et sans condensation, la vapeur s'échappant dans la cheminée pour produire le tirage. Le tirage ne doit jamais être assez activé pour attirer hors du foyer des escarbilles enflammées, toutes les fois du moins que la locomobile est employée dans le voisinage de matières inflammables, ce qui arrive souvent en agriculture : il y aurait, sans cela, danger d'incendie.

Dans la locomobile que représente la figure 309, le cylindre est horizontal et placé au-dessus de la chaudière. La tige du piston, guidée par une glissière, met en mouvement la bielle K, qui s'articule à la manivelle de l'arbre moteur et du volant. La

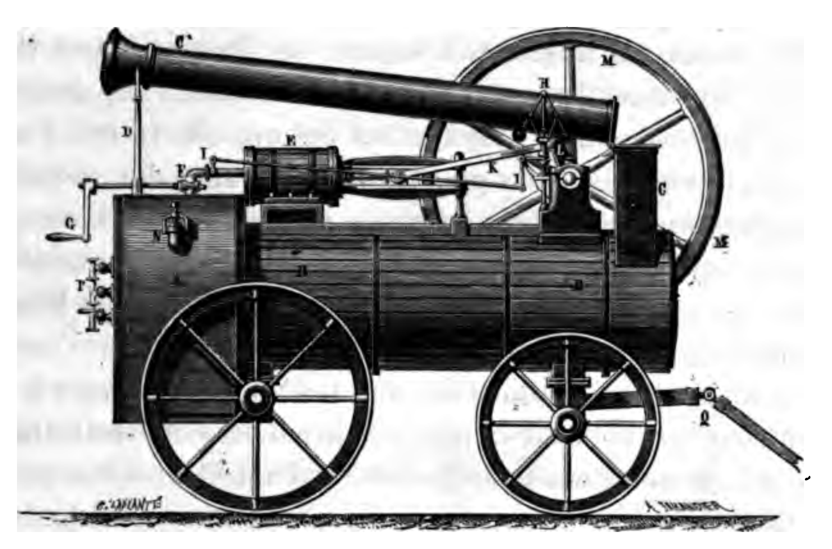


Fig. 309. — Locomobile Calla : A, BB, boîte à feu et corps cylindrique tubulaire ; C, cheminée ; E, cylindre ; M, volant ; K, L, bielle et manivelle ; HH, régulateur.

légende donne l'indication des organes ordinaires de la machine, qui n'ont rien de particulier. On construit en Amérique des machines locomobiles dont la chaudière est verticale, comme le mécanisme moteur.

Les locomobiles sont des machines peu économiques : elles consomment de 5 à 6 kilogrammes de houille par heure et par force de cheval. Nous avons dit qu'elles sont légères, et en effet le poids d'une machine de 4 à 5 chevaux ne dépasse guère 2 tonnes.

§ 6. APPLICATIONS DIVERSES DE LA VAPEUR.

On vient de voir ce qu'est la machine à vapeur, sur quels principes de physique et de mécanique repose sa construction ; quelles sont les formes variées qu'elle a prises pour être appro-

priée aux services multiples qu'on lui demande dans l'industrie manufacturière, dans l'industrie des transports terrestres et maritimes, dans les travaux publics et dans l'agriculture. Il nous reste à dire un mot des applications mêmes de la vapeur, et du rôle immense qu'elle joue dans les sociétés modernes.

Les premières machines à vapeur, on l'a vu, étaient employées à épuiser les eaux des mines : c'étaient les moteurs de pompes puissantes. Aujourd'hui encore, elles servent aux mêmes travaux. Dans les grandes villes, ce sont des machines à vapeur qui puisent dans les rivières et les fleuves l'eau nécessaire aux besoins publics ou domestiques : telles sont, à Paris, les pompes à feu de Chaillot, de Saint-Maur, de Ménilmontant.

En Angleterre et en Hollande, on a installé des machines à vapeur pour faire mouvoir les pompes qui ont desséché des marais, des lacs, comme les lacs de Harlem, de Zuid-Plas, et l'on parle de dessécher de la même manière le Zuiderzée tout entier.

La locomobile est employée partout maintenant dans les travaux publics : nous venons de voir qu'elle fait mouvoir les moutons des sonnettes dans les fondations sur pilotis, les monte-charges des constructions, les grues des chemins de fer et des ports. La vapeur donne le mouvement aux dragues, aux toueurs ou remorqueurs des rivières et des canaux, aux bacs, aux pompes à incendie. Parmi les applications intéressantes de sa puissance mécanique, il faut citer les mille opérations qui ont pour objet la fabrication des machines mêmes, et notamment le forgeage des grosses pièces métalliques. L'outil qui sert à cet usage est le *marteau-pilon*, sur lequel nous croyons devoir donner quelques détails.

Le marteau-pilon à vapeur, qui a tant contribué à développer la fabrication du fer, cette matière première de la mécanique et de l'industrie moderne, a été inventé, vers 1841, par le directeur des forges du Creuzot, M. Bourdon[1]. Ces gigan-

1. Un ingénieur anglais, M. Nasmyth, a suivi de près notre compatriote; mais, d'après Poncelet, c'est bien à M. Bourdon que revient la priorité.

tesques marteaux, qu'emploient toutes les usines où le fer et l'acier sont forgés en pièces de grandes masses, ne reçoivent pas leur mouvement de la machine à vapeur; mais c'est la vapeur qui directement les élève ou les abaisse entre les deux énormes montants de fonte qui leur servent de guide dans leurs allées et venues.

La figure 310 montre comment fonctionne le marteau-pilon. Imaginez un mouton de fonte, dont le poids atteint jusqu'à 15 000 kilogrammes, se mouvant entre deux montants ou glissières, suspendus à la forte tige du piston d'un cylindre où la vapeur peut pénétrer à volonté. Celle-ci arrive par le tuyau V, et de là, par une lumière pratiquée au bas du corps de pompe, sous le piston, qui est alors chassé de bas en haut par la force élastique du fluide. A l'aide d'un levier L, on agit sur une tige T qui abaisse un tiroir latéral, et la vapeur s'échappe dans l'air par une cheminée UE. La vapeur agit ici par simple effet; mais on construit des marteaux-pilons où elle sert à la fois à soulever l'énorme masse et à la précipiter dans sa chute. Voici, sur l'un de ces engins, quelques détails que nous empruntons à l'ouvrage *les Grandes Usines*, de M. Turgan :

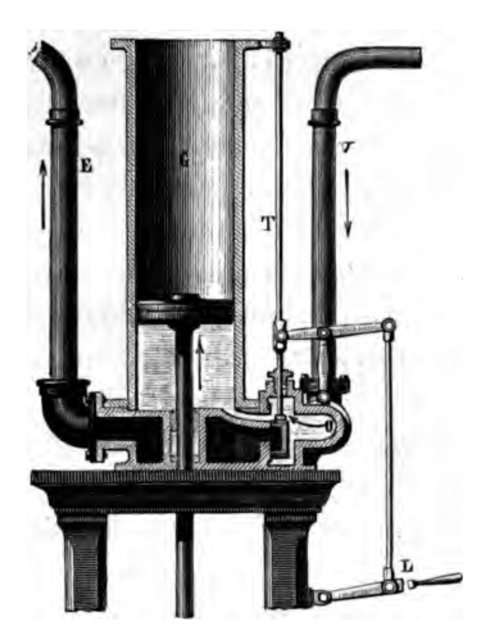


Fig. 310. — Marteau-pilon; coupe du cylindre.

« La compagnie australienne du chemin de fer Victoria a commandé un énorme marteau-pilon à vapeur, qui a été construit dans l'usine de Kirkstall, à Leeds (Angleterre). Ce marteau est à double ou à simple effet : ainsi la vapeur agit dans les deux sens, c'est-à-dire qu'elle peut alternativement soulever

le marteau et arriver en dessus pour précipiter sa chute, et augmenter, par conséquent, l'action de la pesanteur. Cette disposition, qui permet en même temps de multiplier le nombre de coups dans un temps donné, est surtout très avantageuse pour forger des pièces de grandes dimensions; on peut en effet, grâce à elle, opérer le travail en une seule chaude, et l'on économise, de cette manière, du temps, du combustible et du métal.

« L'effet de cet engin puissant est égal à celui que produirait le poids de 16000 kilogrammes frappant quarante coups par minute. L'action alternative du double et du simple effet peut être obtenue instantanément. A l'aide d'un tiroir convenablement disposé, on peut également changer en un instant la chute et la force du coup. On sait que, pour tous les marteaux qui agissent par la gravité, le travail mécanique produit est représenté par le poids de la masse multiplié par la hauteur de la chute. Par conséquent, plus cette hauteur est grande, plus l'action est considérable, mais aussi plus lent est le travail. Avec le marteau à double effet dont il s'agit, la force du coup peut être triplée et la vitesse doublée en même temps. La vapeur qui fait mouvoir le marteau est obtenue avec la chaleur perdue du foyer où l'on chauffe le fer à marteler. Le poids de tout l'appareil, comprenant la masse du marteau, l'enclume, le billot, le cylindre à vapeur, etc., est d'environ 100000 kilogrammes. »

Le marteau-pilon est, pour ainsi dire, une machine à vapeur spéciale, où la force est directement employée à produire le mouvement de l'outil. Dans les grandes usines, fabriques de machines, forges, scieries mécaniques, ce sont le plus souvent les machines fixes, quelquefois les locomobiles, qui donnent et distribuent partout, par l'intermédiaire d'engrenages, de courroies, le mouvement à tous les ateliers : rabotage, alésage, mortaisage, forage, taraudage, polissage des pièces métalliques, tout reçoit son impulsion de la vapeur, et l'on ne sait lequel on doit admirer le plus dans ces travaux formidables, de la

puissance de l'engin, ou de sa docilité à se plier aux usages les plus divers.

N'est-ce pas quelque chose de merveilleux que de voir ces machines-outils travailler l'acier et le fer avec la même aisance que le bois sous la main de l'ouvrier menuisier, charpentier ou

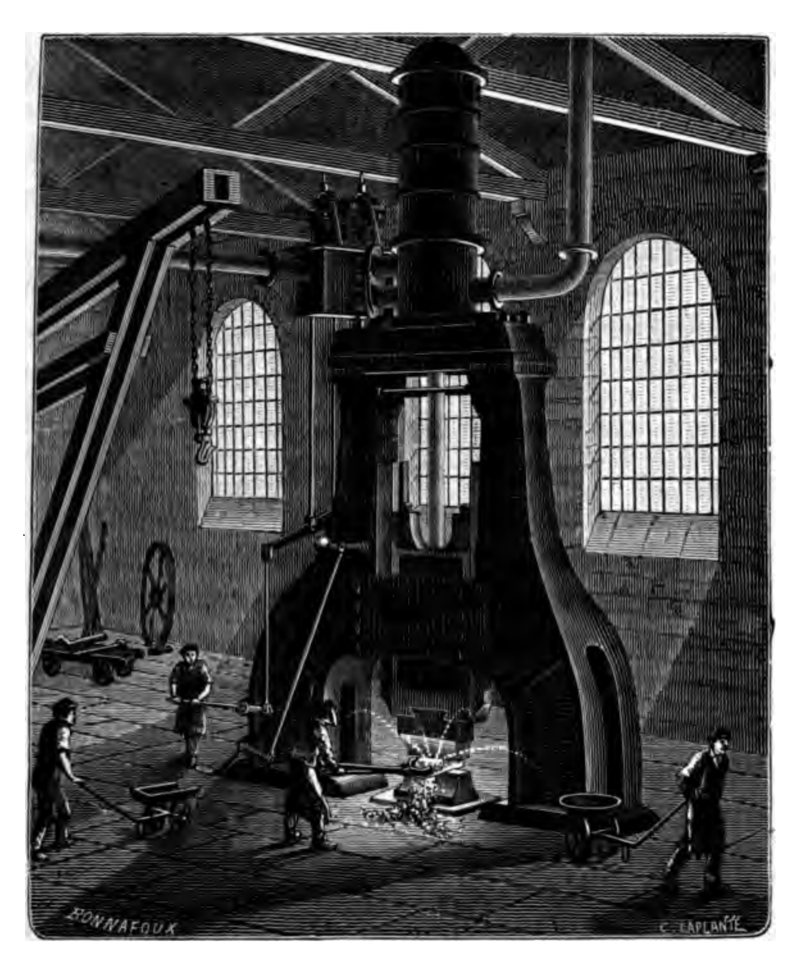


Fig. 511. — Marteau-pilon à vapeur.

charron; ces cisailles découper le fer brut, tailler les épaisses feuilles de tôle, comme le ciseau du tailleur fait de l'étoffe la plus souple? « Autrefois on grattait à peine le fer; aujourd'hui on le rabote comme du bois, on le découpe et on le perce comme du carton. Certaines machines-outils d'Indret sont assez solidement établies pour pouvoir enlever un copeau de 40 milli-

mètres sur une longueur de 11 mètres ; le chariot mobile qui porte le burin pèse à lui seul 14 tonnes. Parmi les machines les plus curieuses d'Indret, nous devons signaler un tour de Mazeline, destiné à raboter circulairement les arbres coudés. Son burin est porté par un disque tournant dans un cadre ; la pièce que l'on travaille traverse ce disque et avance sur un chariot pour présenter successivement à l'outil tous les points qui doivent être atteints. On remarque également un tour en l'air de M. Calla, dont le plateau mesure 5 mètres de diamètre ; des bancs à aléser, à percer, à planer le fer, la fonte et le bronze par tous les moyens connus[1]. »

Si l'on voulait énumérer et décrire, même sommairement, tous les usages de la machine à vapeur dans l'industrie moderne, ce n'est point un chapitre, mais un livre, et un gros livre qu'il faudrait écrire. On la trouverait dans les hauts fourneaux, où des machines horizontales fonctionnent comme souffleries pour activer et entretenir les feux ; dans les tailleries de diamants, où la vapeur imprime aux meules la prodigieuse vitesse de 2500 tours à la minute ; dans les brasseries, où elle met en mouvement les pompes qui servent au transvasement des masses liquides ; dans les papeteries, où elle fait fonctionner les machines laveuses et blanchisseuses du papier ; dans les tuileries, dans les fabriques de literie, de pianos, où elle scie le bois, le découpe en arabesques de toutes formes ; dans les fabriques d'orfèvrerie ; à la Monnaie, où les presses d'Uhlhorn, perfectionnées par Thonnelier et mues par la vapeur, frappent jusqu'à 2400 pièces à l'heure ; dans les fabriques de tabac, de chocolat, et enfin dans cent autres opérations industrielles qui ont besoin d'un moteur puissant, régulier, rapide, continu. Mais il est deux grandes industries où la vapeur joue un rôle d'une importance immense : dans les fabriques de tissus, les filatures, ces pourvoyeuses de vêtements du genre humain tout entier ; puis dans l'imprimerie

1. Turgan, *les Grandes Usines de France*.

typographique et lithographique, qui nous donne l'aliment intellectuel sous sa forme la plus assimilable, le livre et le dessin.

Quelques mots seulement de l'application de la vapeur à l'imprimerie.

C'est en novembre 1814, au moyen d'une presse inventée par F. Kœnig, qu'eurent lieu les premiers tirages de feuilles imprimées par la vapeur. Le journal anglais le *Times* avait eu l'honneur et le profit de ce premier essai, qui permit d'obtenir



Fig. 312. — Presse typographique à vapeur.

mille exemplaires à l'heure. Voici ce que dit M. A. F. Didot de cette application dans son *Essai sur la typographie* :

« Dans cette machine, la *forme* ou châssis contenant les types passe horizontalement, par un mouvement de va-et-vient, sous le cylindre d'impression sur lequel la feuille de papier est enroulée et retenue par des cordons. Dans l'origine, l'encre, chassée par un piston de la boîte cylindrique placée au sommet, tombait régulièrement sur deux rouleaux de fer qui la communiquaient à une série d'autres rouleaux, dont les deux derniers, de cuir, l'appliquaient sur les caractères. Une importante amélioration fut le remplacement du cuir, dont les rouleaux étaient d'abord recouverts, par une composition de colle

forte et de mélasse formant une substance élastique très favorable à l'impression des caractères. La prise d'encre et sa distribution furent postérieurement améliorées. Enfin M. Kœnig réunit deux machines semblables, de manière à pouvoir imprimer un journal des deux côtés à la fois. La feuille, conduite par les rubans, était portée d'un cylindre à l'autre en parcourant le chemin dont la lettre S couchée horizontalement (∽) donne l'idée. Pendant sa course sur les cylindres, la feuille recevait sous le premier cylindre l'impression d'un côté, et sous le second cylindre elle recevait l'impression sur le deuxième côté. Mais il faut avouer qu'en 1814, lorsque M. Bentley me montra cette admirable et immense machine, encore fort compliquée, le second côté de la feuille (la *retiration*) ne tombait pas exactement *en registre*.

« Ce n'est qu'après de longues recherches que MM. Applegath et Cowper sont parvenus à donner à leur presse mécanique un tel degré de perfection, que la feuille conduite par les cordons, après avoir reçu la première impression, passe du premier cylindre sur deux tambours de bois qui la retournent, et va s'appliquer sur le contour d'un second cylindre avec une telle précision, qu'elle rencontre les types de la seconde forme, juste au même point où se trouvent imprimés du côté opposé les caractères de la première forme; après quoi elle vient se déposer sur une table placée entre les deux cylindres, où un enfant la reçoit et l'empile. »

Veut-on savoir à quel degré de rapidité l'impression est parvenue, grâce à l'emploi des presses mécaniques mues par la vapeur? Voici quelques faits caractéristiques à cet égard.

La presse d'Applegath, à huit cylindres, employée à l'impression du *Times*, fournit 11 520 exemplaires à l'heure. Le *New-York Sun*, journal américain imprimé par la presse Hoe, dont chaque page comprend huit colonnes renfermant chacune deux cents lignes de quarante lettres, tire de 16 à 20 000 épreuves à l'heure. Le cylindre central sur lequel s'applique la forme a 6 mètres de développement : huit autres cylindres,

LA VAPEUR APPLIQUÉE A L'IMPRIMERIE.

comme dans la presse d'Applegath, se chargent successivement des feuilles, et les impriment sur huit faces différentes du cylindre central. A l'aide de seize ouvriers, deux par cylindre, on obtient une quantité de travail qui eût jadis exigé plus de trois cents pressiers.

Ajoutons que si l'impression mécanique était jadis inférieure, au point de vue de l'art typographique, à l'impression faite au moyen de l'antique presse à bras, aujourd'hui elle a été tellement perfectionnée, que les amateurs les plus difficiles auraient de la peine à distinguer les produits des deux modes d'impression.

Depuis quelques années, la lithographie emploie la vapeur et des presses mécaniques qui jusque-là avaient été réservées à la typographie. Les résultats obtenus sont remarquables, et la rapidité du tirage est venue apporter une économie importante à une industrie que la concurrence des produits typographiques menaçait sérieusement.

§ 7. STATISTIQUE DES MACHINES A VAPEUR.

Terminons cette revue rapide des innombrables applications de la vapeur par quelques nouvelles données de statistique générale bien propres à montrer la vérité de cette assertion : que la vapeur est l'origine de la plus féconde révolution qui ait jusqu'ici transformé la production humaine, et à justifier le nom de *siècle de la vapeur* qu'on donne quelquefois à notre époque.

En 1865, la France possédait un total de 19 724 machines à vapeur, douées ensemble d'une force de 242 209 chevaux. Dans ce nombre n'étaient point comprises les machines locomotives, dont le chiffre dépassait 4000 et atteint 7000 aujourd'hui. C'est, pour notre pays, un accroissement de puissance productrice équivalant à une population active de plus de 5 millions d'ouvriers, résultat certainement dépassé aujour-

d'hui. En réunissant aux machines fixes employées dans l'industrie les locomotives et les machines des bateaux à vapeur, tant de la marine marchande que de la marine de guerre, on pouvait évaluer à 780000 chevaux-vapeur la force motrice totale alors en activité en France. A Paris seulement, on comptait, à la même époque, 1189 moteurs à vapeur, d'une force totale de 9782 chevaux; et en y comprenant la banlieue (dans le seul département de la Seine), il y avait 2480 machines, d'une force de 19150 chevaux. Le mouvement, sur les voies ferrées, des voyageurs et des marchandises accroîtrait dans une forte proportion les services que, d'après les chiffres qui précèdent, la vapeur rend à notre pays.

En Angleterre, d'après un ingénieur anglais, M. Feyburn, le nombre total des chevaux-vapeur employés atteint le chiffre énorme de 3650000 : c'est une force qui équivaut au travail de 76 millions d'ouvriers, c'est-à-dire plus de trente fois aussi grande que celle des bras qui servent d'auxiliaires aux industries britanniques.

Les chiffres nous manquent pour l'industrie manufacturière des autres pays d'Europe et d'Amérique. Mais on peut se faire une idée de ce qu'ils peuvent être, en considérant l'immense développement qu'a pris le réseau des chemins de fer dans le monde entier, réseau sillonné nuit et jour par la vapeur, celui que tend à prendre de plus en plus la navigation à vapeur sur les mers, les lacs et les fleuves.

En 1867 déjà, la longueur totale de toutes les lignes de fer exploitées sur le globe atteignait 156663 kilomètres, près de seize fois la circonférence entière de notre planète. Depuis, cette longueur a été plus que doublée : l'Amérique du Nord, à elle seule, a augmenté son réseau de 20000 kilomètres; la Russie, de plus de 6000 kilomètres; presque partout de nouvelles lignes ont été construites ou commencées : plus de 100000 locomotives répandent maintenant leurs panaches de vapeur non seulement en Europe, mais dans les Indes, en Australie, jusqu'au Japon, et les *steamboats* sillonnent toutes les mers.

La marine, en effet, a suivi l'exemple de l'industrie manufacturière et de celle des transports terrestres, sur une moindre échelle à la vérité, mais dans une proportion qui va toujours grandissant.

En Europe, sur 100 000 navires formant à peu près le total des bâtiments de la marine marchande, on compte 4500 navires à vapeur; mais il faut ajouter qu'en général le tonnage de ceux-ci dépasse de beaucoup le tonnage des bâtiments à voiles. Ainsi en France, tandis que le tonnage moyen des navires à voiles est de 60 tonneaux, il atteint 280 tonneaux dans les navires à vapeur.

§ 8. EXPLOSION DES MACHINES A VAPEUR.

Nous venons de signaler les bienfaits dont la civilisation est redevable à l'invention de la machine à vapeur et à l'introduction progressivement croissante de ce moteur puissant dans toutes les industries. Il faut maintenant faire la part des malheurs qu'elle a occasionnés et dont nous lisons de temps à autre, dans les journaux, les récits lamentables. Chaque médaille a son revers.

Toutes les explosions de machines à vapeur ont en réalité une cause unique : pour une raison ou pour une autre, la pression de la vapeur produite dans la chaudière dépasse la limite de la résistance des parois; le métal se déchire, éclate sous la force irrésistible du fluide, et, en projetant ses débris, accumule dans son voisinage les ruines et les victimes. Aux effets mécaniques de cette projection terrible se joignent ceux qu'une masse de vapeur à une température élevée ne peut manquer de déterminer : le chauffeur, les ouvriers ou les ingénieurs, toutes les personnes en un mot qu'atteignent les débris métalliques ou la vapeur brûlante, sont horriblement blessés, broyés ou brûlés.

Quelles sont les causes de l'explosion? Nous venons de le

dire. Un accroissement anormal de pression peut provenir lui-même des causes suivantes :

1° Abaissement du niveau de l'eau, qui a pour conséquence une élévation de température des surfaces métalliques soumises à l'action des gaz incandescents du foyer, sans être refroidies intérieurement par l'eau de la chaudière. Ces surfaces arrivent à la température du rouge ; leur résistance décroît, elles se déforment et se déchirent. Le danger est plus grand encore, si alors l'alimentation de la chaudière amène brusquement à leur contact l'eau, qui se transforme en vapeur dans des conditions anormales. La surproduction de vapeur qui en résulte suffit pour déterminer l'explosion.

2° Le même accident peut provenir de la présence des incrustations laissées par les eaux contre les parois. La croûte saline empêche le contact de l'eau et du métal, qui rougit, et si cette croûte vient à se détacher brusquement, l'arrivée de l'eau sur les surfaces rougies détermine une subite et considérable production de vapeur, dont l'explosion de la chaudière peut être la conséquence.

3° L'eau privée d'air et en repos peut être chauffée sans bouillir à une température dépassant de beaucoup 100° ; mais le moindre choc ramène l'ébullition subite et une surproduction de vapeur dangereuse, ainsi que nous l'avons vu en rapportant l'expérience de Donny.

Voilà trois causes d'accident indépendantes du bon état de la machine ou du moins de la solidité de sa construction, indépendantes aussi des bons soins et de la surveillance du chauffeur, la première exceptée, qui est à la vérité l'une des plus fréquentes. Les remèdes préventifs sont, pour celle-ci, une surveillance attentive du niveau de l'eau, et, s'il s'est abaissé, le soin de n'alimenter qu'avec précaution et après ralentissement du feu. Le choix d'une eau non incrustante, ou au cas contraire le nettoyage fréquent des parois intérieures, voilà ce qu'il faut recommander aux chauffeurs ou aux chefs d'usine.

4° La vapeur peut atteindre une pression qui dépasse les

limites de la résistance, si les soupapes de sûreté sont insuffisantes, fonctionnent mal, ou, ce qui est pire encore, bien que malheureusement trop fréquent, si elles sont arrêtées et ne fonctionnent pas du tout. La surveillance de ces appareils doit donc être incessante. « Un mécanicien qui assujettit ses soupapes, dit avec une énergique conviction un célèbre ingénieur anglais contemporain, M. Fairbairn, est comparable à l'insensé qui se précipite dans un magasin à poudre une torche à la main. » L'ignorance seule explique une pratique aussi déplorable; et il est du devoir strict des chefs d'usine et des ingénieurs de la faire cesser, en n'employant que des chauffeurs capables, ou en instruisant ceux qui ne savent point.

5° Enfin une dernière cause d'explosion est la construction vicieuse d'une chaudière, ou, ce qui revient au même, le mauvais état provenant de vieillesse ou d'usure de ses diverses parties.

Nous avons vu, en décrivant les divers types de chaudières, quels sont ceux qui offrent le moins de danger d'explosion; mais le choix des types n'étant pas subordonné à cette seule condition, les accidents sont pour ainsi dire inévitables. C'est dans les usines où les machines fixes sont employées, et sur les bateaux à vapeur, où les machines sont exposées à plus de causes de destruction, que les explosions sont le plus fréquentes et le plus redoutables : elles sont beaucoup plus rares dans les locomotives, ce qui tient sans doute à une surveillance plus active. Elles sont d'ailleurs ici moins dangereuses, parce qu'elles se bornent souvent à la rupture d'un tube, accident auquel le mécanicien remédie immédiatement en fermant le tube à l'aide de tampons.

CHAPITRE XII

LES MACHINES A VAPEURS COMBINÉES, A AIR CHAUD, A GAZ

§ 1. LES MACHINES A VAPEURS COMBINÉES.

Les principes de la théorie mécanique de la chaleur permettent de démontrer que la valeur d'une machine thermique, son rendement, ou, ce qui est la même chose, son *coefficient économique*, dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la différence des températures extrêmes entre lesquelles elle fonctionne. Il importe peu, à ce point de vue, qu'on emploie un liquide ou un autre pour obtenir la vapeur dont la force élastique est utilisée comme moteur. La quantité de chaleur dépensée étant la même, comme c'est cette chaleur qui se convertit en travail, le travail de la machine reste le même.

On comprend donc qu'il peut y avoir avantage à employer un liquide qui se vaporise à une température inférieure à celle de la vaporisation de l'eau. L'éther sulfurique, par exemple, bout à 37°. La vapeur d'eau qui, au sortir du cylindre, vient se liquéfier dans le condenseur, abandonne une quantité de chaleur suffisante pour vaporiser l'éther. La vapeur de ce dernier liquide peut alors servir à faire fonctionner une seconde machine annexée à la première, et dont le condenseur peut ainsi être maintenu à une température inférieure à celle du condenseur de la vapeur d'eau. Cette combinaison revient à accroître la différence entre les températures extrêmes où le fluide élastique fonctionne, depuis son entrée dans le cylindre

jusqu'à sa sortie dans l'atmosphère ou sa condensation. La quantité de chaleur utilisée ou de travail mécanique sera donc accrue d'autant.

Tel est le principe sur lequel sont basées les machines à vapeurs combinées, dont nous allons dire quelques mots.

Un ingénieur français, M. du Tremblay, a imaginé et fait construire, en 1840, une machine à vapeurs combinées d'eau et d'éther, qui a été installée sur un des paquebots faisant le service régulier d'Alger à Marseille. Voici quelles en étaient les dispositions principales.

En sortant du cylindre, la vapeur d'eau arrive dans un condenseur clos traversé par une série de tubes verticaux en partie remplis d'éther. En se condensant autour des tubes, la vapeur d'eau leur communique sa chaleur de vaporisation et élève assez leur température pour que l'éther qu'ils renferment se réduise lui-même en vapeur. La vapeur d'éther, recueillie dans un réservoir supérieur, est admise, de là, dans un cylindre où elle agit sur un piston dont la tige est liée à l'arbre de la machine. Le travail de ce piston s'ajoute ainsi au travail du piston que fait mouvoir la vapeur d'eau.

Au sortir du second cylindre, la vapeur d'éther passe dans un condenseur spécial également formé d'un système de tubes, mais ceux-ci entourés d'une masse d'eau froide sans cesse renouvelée. Cette vapeur reprend donc l'état liquide sous l'influence du refroidissement des tubes, et l'éther qui en résulte est refoulé, par une pompe que meut le balancier, dans le réservoir situé à la partie inférieure des tubes du premier condenseur. L'eau de condensation, échauffée par l'excès de chaleur de la vapeur d'eau, est d'ailleurs refoulée elle-même dans la chaudière.

La grande inflammabilité de l'éther, qu'on ne pouvait, malgré les plus grandes précautions, empêcher de s'échapper par les joints des organes, rendait ces machines dangereuses, à cause des explosions ou des incendies possibles. Néanmoins elles ont été longtemps expérimentées sur les bateaux *le Du*

Tremblay et *le Galilée*, ainsi que dans une cristallerie de la Guillotière, à Lyon, où fonctionnait une machine fixe de ce système.

Un officier de marine, M. Lafond, substitua le chloroforme à l'éther; mais si la vapeur de cette substance n'est point inflammable, elle est asphyxiante; de plus, l'expérience a montré que, sous son action, les garnitures des pistons étaient promptement détériorées. Les essais dont nous parlons ont été faits sur la machine du *Galilée*. On a employé aussi des vapeurs combinées d'eau et de sulfure de carbone, ou bien d'eau et de chlorure de carbone.

Une autre machine fort intéressante, que nous avons vue fonctionner à l'Exposition universelle de 1867, est la machine à ammoniaque de M. Frot, ingénieur de la marine.

A l'eau de la chaudière M. Frot substitue une dissolution ammoniacale. On sait qu'à la température ordinaire de 15° l'eau dissout 750 fois environ son volume de gaz ammoniac, et que, si on la chauffe jusqu'à 100°, le gaz dissous s'évapore entièrement : il n'en reste plus trace dans l'eau de dissolution. C'est sur cette double propriété que M. Frot s'est appuyé pour construire sa machine, les expériences qu'il fit sur la tension du liquide à diverses températures lui ayant prouvé que cette tension, qui est déjà, à 100°, de 7 atmosphères et demie, atteint 10 atmosphères à 120°. Mais il fallait, pour rendre pratique et économique l'emploi de la force élastique des vapeurs ammoniacales, résoudre deux problèmes : le premier consistait à condenser la vapeur à sa sortie du cylindre, de manière à obtenir une différence de pression suffisamment considérable; le second, à régénérer la dissolution ammoniacale, en se servant le plus longtemps possible du même liquide.

C'est à quoi M. Frot est parvenu sans modifier essentiellement les dispositions des machines à vapeur ordinaires. Au sortir du cylindre, les gaz, après avoir exercé leur action sur le piston moteur (ils sont alors formés d'un mélange de 1 partie de vapeur d'eau et de 5 parties de gaz ammoniac), sont dirigés dans un condenseur *à surface* formé d'une triple série de tubes

qu'entoure un courant continu d'eau froide. Pour rendre la condensation plus prompte, le jeu d'une pompe injecte dans la chambre qui sépare les deux premières rangées de tubes une dissolution ammoniacale à basse température non saturée, laquelle est elle-même prise dans la chaudière. Du condenseur, les gaz refroidis et en partie dissous arrivent dans un réservoir qu'on nomme *dissoluteur tubulaire*. Là ils achèvent de se dissoudre au contact d'une dissolution ammoniacale non saturée, et sont ramenés par une pompe alimentaire dans la chaudière. Dans ce dernier trajet, la dissolution régénérée chemine à travers des serpentins plongés dans le liquide qui, comme on vient de le dire, sert à l'injection. Elle prend à ce dernier la chaleur qu'il possède, ce qui est doublement utile, puisque la dissolution d'alimentation rentre plus chaude dans le générateur, et que la dissolution d'injection arrive au contraire plus froide au condenseur.

Les vapeurs ammoniacales attaquant le cuivre, il faut remplacer par du fer forgé toutes les pièces de bronze des machines ordinaires. Les expériences faites ont prouvé que la machine à ammoniaque offre sur les machines à vapeur d'eau divers avantages : outre l'économie de combustible, qui paraît assez considérable, et la rapidité de la mise en pression, il faut compter l'absence presque complète d'incrustation des chaudières, puisque le même liquide fonctionne longtemps, et que d'ailleurs l'ammoniaque préserve les parois des causes d'oxydation. Mais le principal inconvénient est, comme pour les machines à vapeurs combinées, la difficulté de s'opposer aux fuites du gaz, et le danger qui résulte d'un mélange avec l'air ambiant d'une substance dont l'action sur les organes respiratoires est si dangereuse.

§ 2. LES MACHINES A AIR CHAUD.

Dans les machines que nous venons de décrire, c'est la combinaison de la vapeur d'eau avec celle d'un liquide plus volatil,

ou avec un gaz que la chaleur force à se dégager de sa dissolution, qui est le moteur employé. La vapeur d'eau y joue donc toujours un rôle important. On a essayé de lui substituer une force élastique entièrement distincte, celle qu'on obtient en échauffant un gaz permanent comme l'air, ou en enflammant un mélange gazeux explosif. De là deux nouvelles espèces de machines motrices, les *machines à air chaud* et les *machines à gaz*. Ce sont d'ailleurs toujours des machines thermiques, car c'est toujours à la chaleur qu'est emprunté le travail mécanique qu'elles utilisent.

Les premiers essais ayant pour objet d'employer comme force motrice l'air dilaté par la chaleur remontent, paraît-il, à Montgolfier. L'un des inventeurs de la photographie, J. Niepce, s'occupa aussi du même problème. Mais, dès 1816, Robert Stirling construisait une machine à air chaud qui, d'après un juge compétent en ces matières, E. Verdet, est « à la fois la plus simple en théorie et la plus éprouvée par l'expérience ».

Depuis, un ingénieur suédois, Ericsson, conçut et fit exécuter une machine à air chaud qui fonctionna sur un navire américain en 1853. Voici en quels termes M. Collignon définit le principe du nouveau moteur :

« Dans sa première machine, le capitaine Ericsson plaçait un *régénérateur*, formé d'un grand nombre de toiles métalliques, sur le chemin de l'air échauffé qui sortait du cylindre moteur, quand le piston prenait son mouvement rétrograde. Le cylindre moteur était chauffé directement par le foyer. Il transmettait son mouvement à un *cylindre alimentaire*, véritable pompe qui prenait l'air dans l'atmosphère et le comprimait dans un réservoir ; de là, l'air venait sous le piston moteur en traversant les toiles métalliques, où il s'échauffait aux dépens de la chaleur abandonnée par l'air chaud précédemment expulsé. »

Ericsson a modifié depuis la machine à air chaud dont il est l'inventeur. Il a supprimé les toiles métalliques, et l'air chaud, après avoir exercé son action sur le piston moteur, est rejeté directement dans l'atmosphère : c'est donc une machine à

simple effet, et, pour la mettre en train, il faut d'abord donner à la main le mouvement au volant. La machine Laubereau, que nous allons décrire, est, sous ce dernier rapport, semblable à la machine d'Ericsson et en fera comprendre le mécanisme. Rien d'ailleurs n'est plus simple.

Le mécanisme moteur de la machine Laubereau se compose de deux cylindres métalliques A, B, d'inégal diamètre, dont les capacités intérieures communiquent ensemble par un tube *t*. Dans le premier, qui est ouvert à sa partie supérieure, se meut un piston plein P, qui remplit hermétiquement le cylindre et s'oppose à toute communication de la capacité interne avec l'air extérieur. Ce sont le *cylindre* et le *piston moteurs* de la machine.

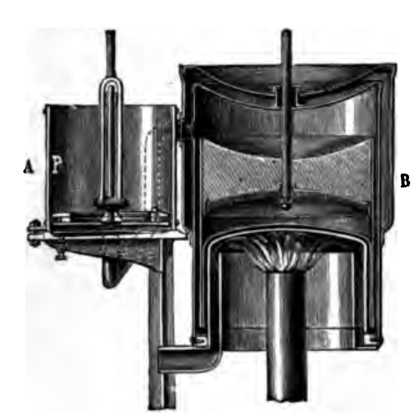


Fig. 313. — Coupe des cylindres dans la machine Laubereau.

Le grand cylindre B est complètement fermé par ses deux fonds supérieur et inférieur, tous deux de forme concave. Un piston épais, formé d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur, de plâtre par exemple, se meut également dans le cylindre, mais sans en toucher les parois : il est de forme doublement concave, de manière à pouvoir également s'adapter sur l'un et sur l'autre fond du cylindre. C'est ce qu'on peut appeler le *cylindre alimentaire*, parce que c'est l'air qu'il contient qui, alternativement échauffé et refroidi, va exercer son action sur le piston moteur, où au contraire cesse cette action à chaque période de mouvement.

Pour obtenir ces effets successifs, un foyer de chaleur (ici, c'est un bec de gaz) échauffe extérieurement la concavité du fond inférieur du grand cylindre, et, par suite, l'air qui est sous le piston. La pression de cet air surpasse donc la pression atmosphérique, et dès lors, poussant par-dessous le piston P du petit cylindre, lui donne un mouvement ascen-

sionnel qui se communique par le mécanisme ordinaire à l'arbre et au volant de la machine. L'autre piston redescend alors, et vient s'appliquer sur le fond inférieur, de manière à intercepter toute communication de la chaleur du foyer avec l'air qu'il contient. Ce dernier se trouve au contraire en con-

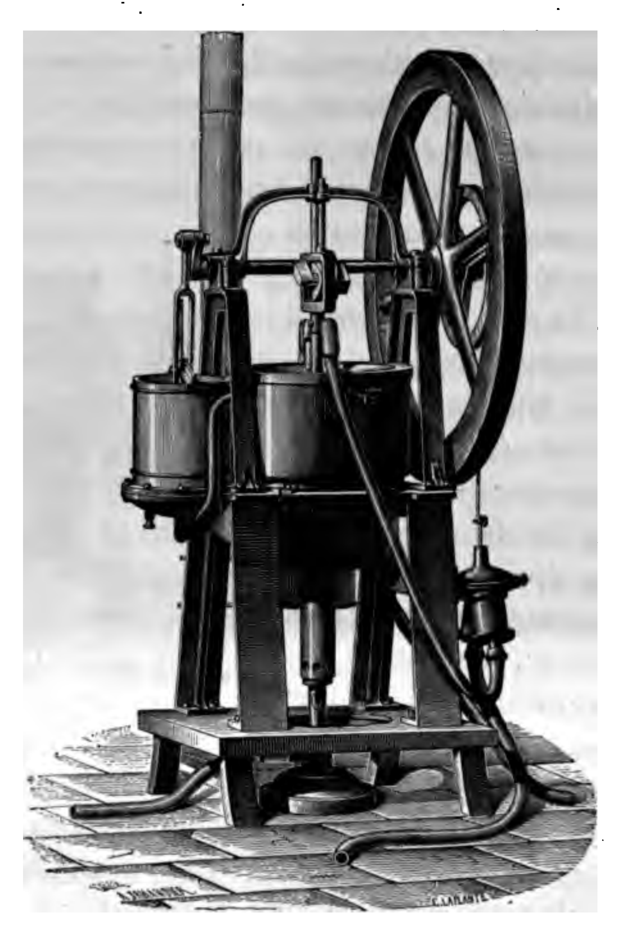


Fig. 314. — Machine à air chaud de Laubereau.

tact direct avec le fond supérieur du grand cylindre, qui est double et où circule un courant continu d'eau froide. L'air refroidi se condense; sa force élastique diminue. La pression atmosphérique reprend le dessus, et le piston moteur redescend, pendant qu'au contraire le piston de plâtre remonte, et laisse de nouveau l'air s'échauffer.

Cette période se reproduit indéfiniment et donne à la machine

son activité continue. Une pompe, que fait fonctionner l'arbre moteur, amène constamment dans le double fond du grand cylindre l'eau froide nécessaire à la réfrigération de l'air qui vient d'agir, et enlève celle qui s'échauffe quand cet air cède sa chaleur aux parois.

Les machines à air chaud, comme toutes les machines thermiques à gaz différentes de la machine à vapeur proprement dite, seraient avantageuses pour la petite industrie, qui n'a besoin que de forces motrices assez faibles et pouvant être souvent interrompues. La facilité de la mise en train les rend, sous ce rapport, économiques ; mais elles ne le seraient plus pour des forces motrices considérables devant agir continûment, comme dans les grandes usines.

L'air chaud a bien, sur la vapeur d'eau, un avantage : c'est qu'entre des limites éloignées de température on a des pressions beaucoup moindres; la quantité de chaleur emmagasinée, et par suite de travail, peut donc être fort grande, sans qu'on ait à craindre le défaut de résistance des enveloppes des chaudières; mais aussi, pratiquement, si l'on a besoin d'une grande force motrice, il faut augmenter beaucoup la surface des pistons. D'autre part, à de hautes températures, l'air chaud brûle les garnitures des pistons, oxyde et détériore les surfaces métalliques avec lesquelles il est en contact. La vapeur d'eau n'a pas ces inconvénients.

§ 3. LES MACHINES A GAZ.

Arrivons maintenant à d'autres moteurs que l'on commence à employer assez fréquemment aussi dans les petites industries : nous voulons parler des *machines à gaz*.

C'est bien encore l'air dilaté qui fournit la force motrice de ces machines; mais, au lieu d'être dilaté par l'action d'une source de chaleur entretenue sous la capacité qui le contient, il l'est par l'effet du dégagement de chaleur que produit l'in-

flammation spontanée d'un mélange détonant. Ce mélange est formé d'air et de gaz d'éclairage en proportions convenables.

Les différentes manières de produire cette inflammation ont donné lieu à des machines à gaz de dispositions variées. Citons seulement le moteur Lenoir, où le mélange explosif, formé de 90 parties d'air et de 10 parties de gaz, est enflammé par les étincelles successives d'une bobine d'induction; le moteur Hugon, où c'est un bec de gaz mobile qui met le feu au mé-

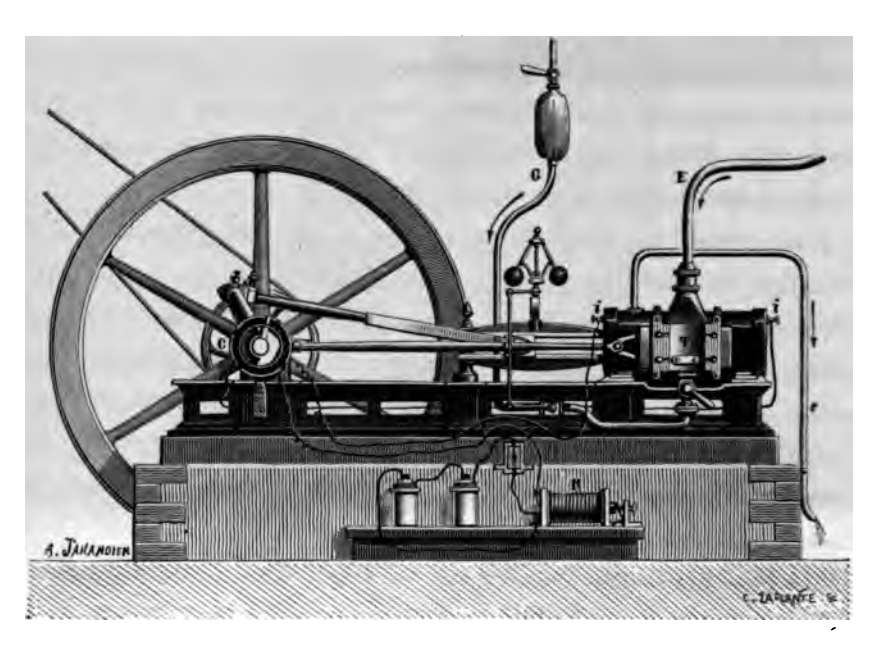


Fig. 315. — Moteur à gaz du système Lenoir.

lange; et enfin la machine Otto et Langen, où l'inflammation est déterminée aussi par un bec allumé, mais fixe. Examinons rapidement les dispositions essentielles de chacun de ces moteurs.

Le moteur Lenoir ne diffère des machines à vapeur, au point de vue de l'aspect extérieur, que par l'absence de chaudière et la disposition particulière du mécanisme de distribution.

Le cylindre moteur est un corps de pompe de grand diamètre, posant horizontalement sur le socle de la machine, et la tige donne le mouvement, par une bielle et une manivelle,

à l'arbre, muni d'un côté d'une poulie motrice, de l'autre côté d'un volant. Latéralement, le cylindre est flanqué de deux tiroirs T mus par des excentriques ; l'un d'eux sert à introduire alternativement des deux côtés du piston le mélange explosif d'air et d'hydrogène qui arrive par le piston G; l'autre tiroir sert à faire échapper les produits de la combustion.

Sur le bâti de la machine est installée une bobine de Ruhmkorff, alimentée par une pile de Bunsen. C'est elle qui fournit les étincelles successives destinées à enflammer le mélange gazeux dans chacune des chambres du cylindre. Pour cela, les fils de l'hélice induite viennent aboutir chacun en *ii*, à l'un des fonds métalliques du cylindre, où ils pénètrent par une tige isolante de porcelaine : l'étincelle jaillit entre le piston et ce fil de platine. Le mélange explosif qui arrive au même instant dans la chambre, grâce au mouvement du tiroir, s'enflamme successivement. C'est la chaleur résultant de ces explosions successives qui se communique à l'air, et, le dilatant, fournit la force motrice. En même temps, l'autre tiroir fait échapper les gaz provenant de la combustion qui a eu lieu dans l'autre chambre. De là le mouvement alternatif du piston et celui de l'arbre et du volant.

Comme les parois du cylindre s'échauffent à chaque explosion, elles sont, pour éviter la température élevée qui en serait bientôt la conséquence, entourées d'un manchon dans lequel circule d'une façon continue un courant d'eau froide ; ce courant arrive par le tube E et sort par le tube *e*.

Le moteur Hugon diffère surtout, nous l'avons dit, du moteur Lenoir, par le mode d'inflammation du mélange gazeux. Au lieu d'étincelles d'induction, c'est un bec de gaz qui est alternativement amené, par le mouvement même de la machine, en contact avec le gaz, ou en est éloigné.

Sous ce rapport, la machine à gaz d'Otto et Langen ressemble au moteur Hugon; mais elle se distingue de ce dernier, ainsi que du moteur Lenoir, par un point essentiel. C'est une machine à simple effet, et ce n'est plus la force du gaz échauffé

et dilaté qui sert de force motrice, mais bien la pression atmosphérique. En un mot, le principe de son mouvement est analogue à celui des premières machines à vapeur, des machines de Newcomen.

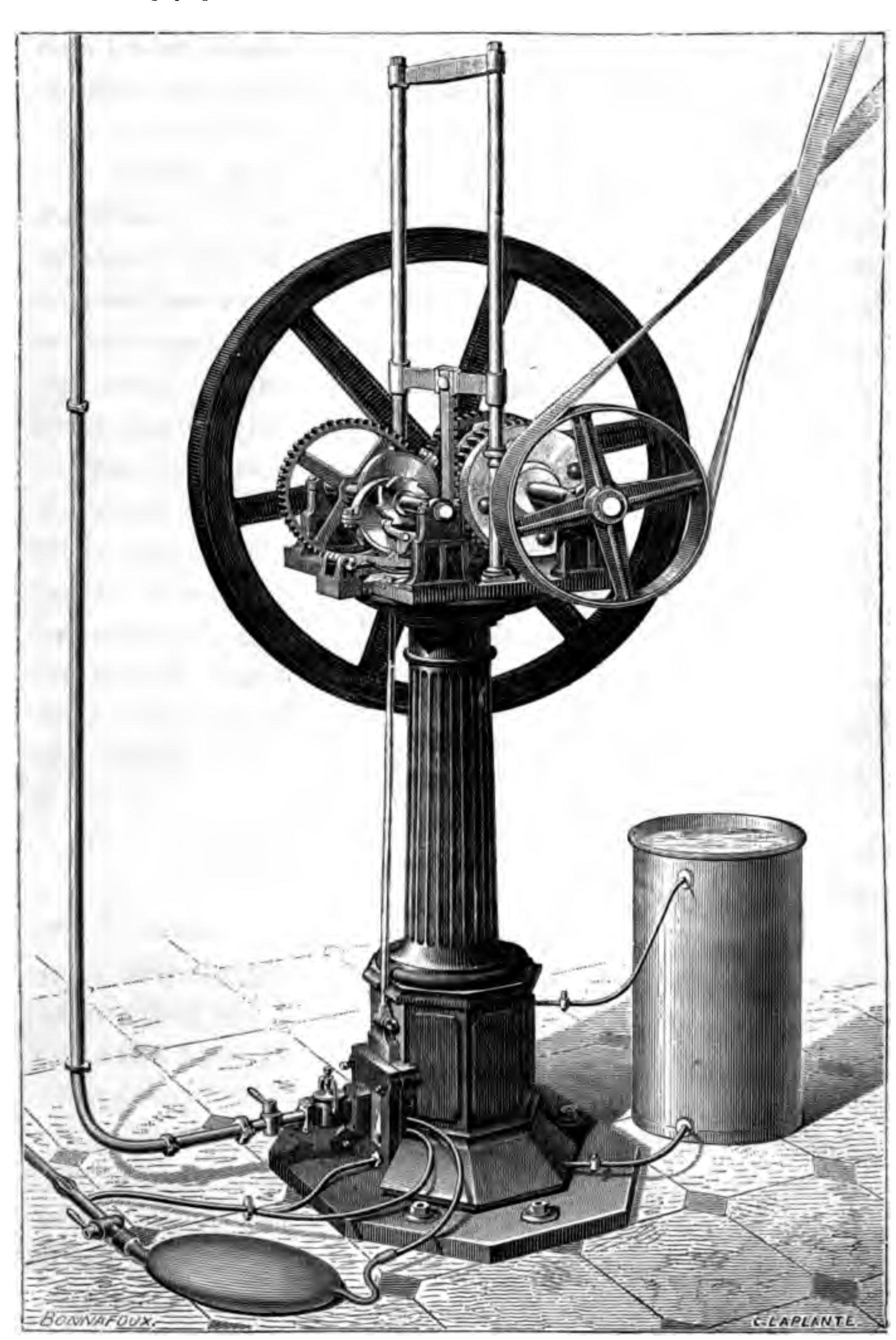
La planche VIII en montre la disposition d'ensemble.

Dans la colonne qui porte à son sommet les organes de transmission, se trouvent renfermés le cylindre et le piston moteur. Le cylindre est ouvert par en haut, et c'est seulement dans la chambre inférieure au piston qu'arrive le gaz inflammable. Un bec de gaz, qui est constamment allumé, est logé dans une cavité située latéralement à la partie inférieure du cylindre; on voit ce bec sur la figure. Quand la communication est établie entre le bec et l'espace qui renferme le gaz détonant, ce qui se fait à l'aide du mouvement d'une plaque que commande une tige à excentrique calée sur l'arbre, l'inflammation a lieu : le mélange s'échauffe et se dilate brusquement sous le piston, qui est soulevé jusqu'au haut du cylindre. Cette partie du mouvement n'est point utilisée, et la tige du piston remontant, qui s'engrène comme une crémaillère à une roue dentée calée sur l'arbre, fait tourner cette roue comme poulie folle. Quand le piston redescend sous l'action prédominante de la pression atmosphérique, sa tige et la roue d'engrenage font tourner l'arbre et le volant : c'est la phase motrice proprement dite.

On voit, à gauche de la figure, un tube qui amène le gaz d'éclairage : il se termine par trois tubes, dont l'un sert à alimenter le bec allumé, le second à fournir du gaz à la chambre de distribution, le troisième à introduire le même gaz au-dessous du piston dans le cylindre.

Terminons cette description des moteurs thermiques, dont l'invention est encore toute récente, par quelques observations sur leurs avantages et sur leurs inconvénients, tels que les fournissent à la fois la théorie et l'expérience.

Au point de vue théorique, les machines à gaz ou à air chaud (elles ont au fond le même principe) auraient sur les machines à vapeur cet avantage, nous l'avons dit en commençant, que



MACHINE A GAZ D'OTTO ET LANGEN.

la température du gaz peut atteindre une valeur beaucoup plus élevée, tout en ne donnant qu'une pression assez faible. Comme le travail mécanique ne dépend que de l'écart entre les températures extrêmes, il s'ensuit qu'on peut utiliser une portion plus grande de travail sans avoir à craindre les accidents d'explosion : avec une puissance aussi forte, les parois des organes peuvent être moindres ; mais, d'autre part, nous avons vu aussi que les températures élevées des gaz ont un effet destructeur sur les garnitures et sur les pièces métalliques. L'avantage se trouve donc en grande partie détruit par ce grave inconvénient.

Mais les machines à gaz offrent sur les moteurs à vapeur d'eau une supériorité incontestable au point de vue de la sécurité : elles sont à peu près à l'abri de toute explosion, de toute crainte d'incendie. Leur mise en mouvement est facile et prompte : un simple robinet ouvert ou fermé permet leur mise en train ou l'arrêt de la machine. N'ayant ni foyer ni chaudière, elles sont moins encombrantes, et exigent, pour le fonctionnement et la surveillance, un personnel beaucoup plus restreint.

Économiquement parlant, elles sont au contraire inférieures aux machines à vapeur. Il résulte en effet d'expériences faites par M. Tresca sur le moteur Lenoir que la consommation du gaz s'élève de 2500 à 3000 litres par force de cheval et par heure : c'est cinq ou six fois la dépense de la machine à vapeur en combustible. Ce moteur exige d'ailleurs une forte dépense d'eau pour le refroidissement du cylindre et du piston moteur. La machine à gaz Otto et Langen est beaucoup plus bruyante [1] que la machine Lenoir, qui l'est cependant déjà : les mouvements brusques du piston doivent y être une cause de détérioration rapide. Tous les moteurs à gaz ont d'ailleurs cet inconvénient, qu'ils ne peuvent s'installer que là où existent des usines productrices de ce gaz même, et c'est dans ces usines

1. M. Otto a construit depuis une machine à gaz horizontale, qui est tout à fait silencieuse et dès lors n'est plus sujette à l'inconvénient que nous signalons.

alors qu'on retrouve les inconvénients des machines à vapeur. Mais si on ne les considère que comme des moteurs d'un usage restreint, c'est-à-dire applicables à la petite industrie, où la force motrice utile ne dépasse point quelques chevaux-vapeur, alors ils reprennent leur supériorité, même au point de vue économique relatif. Ils peuvent se concilier en effet avec toutes les exigences des arrêts et des reprises fréquents du travail, et la dépense cesse aussitôt; tandis que les moteurs à vapeur, une fois allumés et en train, consomment toujours pendant ces interruptions. A ce point de vue, les machines à air chaud et à gaz offrent un véritable intérêt : elles rendront de grands services, si d'ailleurs, comme il est probable, elles reçoivent des perfectionnements comparables à ceux qu'a reçus la machine à vapeur.

CHAPITRE XIII

UTILISATION DE LA CHALEUR SOLAIRE

§ 1. MIROIRS ET VERRES ARDENTS.

Est-il vrai qu'Archimède, à l'aide de miroirs ardents, incendia la flotte des Romains qui, sous la conduite de Marcellus, assiégeaient Syracuse? Est-il vrai que Proclus en fit autant à la flotte de Vitalien pendant le siège de Byzance?

Voilà une question qui a été fort controversée, à laquelle Descartes, dans sa *Dioptrique*, a répondu par la négative, que des érudits ont résolue en des sens divers, mais qui prouve tout au moins que les anciens connaissaient la propriété des miroirs concaves de réfléchir à leur foyer et de condenser en un fort petit espace les rayons émanés d'une source de chaleur.

Ils connaissaient aussi les effets de la réfraction à travers une masse de verre taillée en boule ou en lentille, comme il résulte d'un passage fort curieux des *Nuées* d'Aristophane.

La discussion du point historique, d'ailleurs intéressant, dont il s'agit, a eu le mérite de provoquer des expériences qui ont mis hors de doute l'intensité des effets calorifiques qu'on peut produire en rassemblant les rayons du soleil au foyer d'un miroir sphérique ou parabolique, ou encore au foyer d'une ou plusieurs lentilles. Voici les principaux résultats de quelques-unes de ces expériences d'après l'*Encyclopédie* de D'Alembert et Diderot :

« Les plus célèbres miroirs ardents, parmi les modernes,

sont ceux de Septala, de Villette, de Tschirnhausen. Le miroir ardent de Manfredus Septala, chanoine de Milan, était un miroir parabolique qui, selon Schot, mettait le feu à des morceaux de bois à la distance de 15 ou 16 pas. Le miroir ardent de Tschirnhausen égale au moins le miroir de Septala pour la grandeur et pour l'effet. Voici ce qu'on trouve sur ce sujet dans les *Acta eruditorum* de Leipzig :

« Ce miroir allume du bois vert en un moment, en sorte qu'on ne peut éteindre le feu en soufflant violemment dessus. Il fait bouillir l'eau, en sorte qu'on peut très promptement y faire cuire des œufs, et, si on laisse cette eau un peu de temps au foyer, elle s'évapore. Il fait fondre en un moment un mélange d'étain et de plomb de trois pouces d'épais : ces métaux commencent à fondre goutte à goutte, ensuite ils coulent continuellement, et en deux ou trois minutes la masse est entièrement percée. Il fait aussi rougir promptement des morceaux de fer ou d'acier, et, peu après, il s'y forme des trous par la force du feu... Le cuivre, l'argent, etc., se liquéfient aussi quand on les approche du foyer. Il fait aussi rougir, comme le fer, les matières qui ne peuvent fondre, comme la pierre, la brique, etc. »



Fig. 316. — Miroir ardent.

Le miroir de Tschirnhausen avait trois aunes de Leipzig de large ($1^{m},69$), son foyer était à deux aunes de distance ($1^{m},13$); il était de cuivre et d'une faible épaisseur.

Un ouvrier français de Lyon, Villette, construisit plusieurs grands miroirs, dont l'un échut à l'Académie des sciences. C'était un segment d'une sphère de 76 pouces ($2^{m},06$) de rayon,

par conséquent de 38 pouces ($1^m,03$) de foyer; il avait $1^m,27$ d'ouverture; la substance dont il était formé était un alliage d'étain, de cuivre et de mercure. Ses effets calorifiques furent comparables à ceux du miroir ardent décrit plus haut.

Buffon fit aussi, au siècle dernier, de curieuses expériences en se servant, pour concentrer les rayons solaires, non plus d'un miroir concave, mais d'une série de miroirs plans disposés de manière à renvoyer vers un seul point les rayons du soleil. « Il a formé un grand miroir composé de plusieurs miroirs plans (il y en avait cent) d'environ un demi-pié en quarré; chacun de ces miroirs est garni, par derrière, de trois vis par le moyen desquelles on peut, en moins d'un quart d'heure, les disposer tous de manière qu'ils renvoyent vers un seul endroit l'image du soleil. M. de Buffon, par le moyen de ce miroir composé, a déjà brûlé à 200 piés de distance. » (*Encyclop.*) En effet, à cette distance, il enflamma du bois; à 140 pieds, il fit fondre du plomb, et à 100 pieds de l'argent.

L'illustre naturaliste et physicien avait voulu réaliser ainsi l'hypothèse d'un poète grec, Tzetzès, qui croyait que c'était par ce moyen qu'avaient été brûlés les navires romains à Syracuse. C'était démontrer, par le fait, la possibilité de l'invention d'Archimède et de l'acte patriotique attribué au plus grand géomètre de l'antiquité. Mais Buffon avait été devancé, sans le savoir, par le P. Kircher, et, plus anciennement encore, par Anthémius, architecte de Sainte-Sophie, qui doit être considéré comme le véritable inventeur des miroirs plans articulés.

Bernières fit construire en 1757 un miroir concave de verre étamé, de $1^m,16$ d'ouverture, au foyer duquel l'argent et même le fer fondaient en quelques secondes; les cailloux se ramollissaient et coulaient comme du verre. (Daguin, *Traité de physique.*)

Voici maintenant quelques détails sur les effets calorifiques dus à la réfraction au travers d'une lentille convergente, c'est-à-dire à ce qu'on a nommé un *verre ardent*. Les mêmes physiciens qui firent des expériences à l'aide des miroirs en firent

également avec des lentilles de grandes dimensions. « Le verre le plus considérable de cette sorte, dit D'Alembert dans l'*Encyclopédie*, était celui de M. Tschirnhausen : la largeur de la lentille était de 3 à 4 piés ; le foyer était éloigné de 12 piés, et il avait 1 pouce et demi de diamètre ; de plus, afin de rendre le foyer plus vif, on rassemblait les rayons une seconde fois par une seconde lentille parallèle à la première, qui était placée dans l'endroit où le diamètre du cône des rayons formés par la première lentille était égal à la largeur de la seconde, de sorte

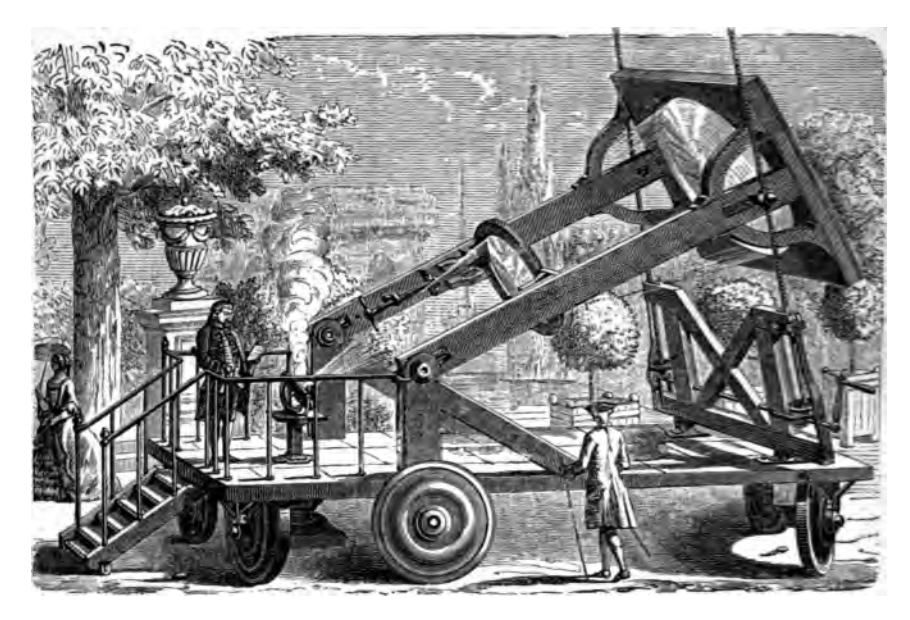


Fig. 317. — Verre ardent de Bernières.

qu'elle les recevait tous. » Les effets furent semblables à ceux du miroir ardent du même expérimentateur.

Une des plus curieuses expériences qui aient été faites sur la réfraction de la chaleur est celle de Mariotte, qui fit une lentille convexe avec un morceau de glace obtenu par la congélation d'eau bien pure et purgée d'air. Avec ce verre ardent d'un nouveau genre, Mariotte alluma de la poudre fine.

Il faut citer enfin le verre ardent de Bernières, construit en 1774 aux frais d'un correspondant de l'Académie des sciences, Trudaine, sur le principe de celui de Tschirnhausen, et dont

la figure 317 donne la disposition. Le mécanisme qu'on y voit représenté avait pour objet de permettre à un seul homme de diriger l'ensemble des deux lentilles, de façon que les rayons solaires pussent converger toujours au même point.

Les verres ardents avaient un inconvénient qui les rendait inférieurs aux miroirs : c'est qu'en traversant des lentilles épaisses, la masse du verre absorbait une partie des rayons de chaleur. C'est à quoi Buffon chercha à remédier en imaginant les lentilles à échelons, qui consistent en un assemblage de couronnes dont chacune fait partie d'une lentille ayant une distance focale constante, mais ayant une moindre épaisseur dans les parties centrales. Nous avons déjà décrit ces appareils, qui ont été perfectionnés par Fresnel pour l'éclairage des phares.

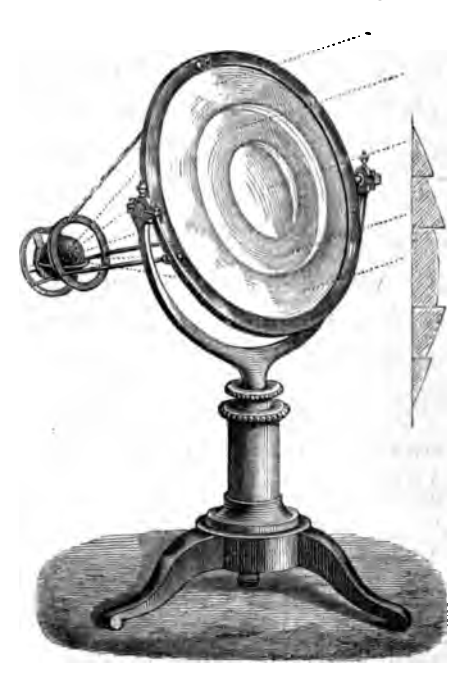


Fig. 318. — Verre ardent formé d'une lentille à échelons.

Nous avons vu plus haut qu'on a appliqué les verres et miroirs ardents à une question intéressante d'astronomie physique, celle de savoir si les rayons solaires parvenus jusqu'à nous, après leur réflexion à la surface de la lune, possèdent encore une chaleur appréciable. Si un grand nombre d'observateurs, depuis Lahire et Tschirnhausen, jusqu'à Forbes et Tyndall, n'ont pu rien constater, en revanche Melloni, en 1846, et depuis Piazzi Smith, lord Rosse, Marié-Davy, ont reconnu un effet calorifique sensible, ainsi que le prouvent les expériences décrites dans le chapitre XIV de la première partie de ce volume.

§ 2. PREMIERS ESSAIS D'UTILISATION DE LA CHALEUR SOLAIRE.

La chaleur du Soleil peut être utilisée de deux manières : ou bien directement, c'est-à-dire concentrée en vue d'effets purement calorifiques, pour la fusion ou la volatilisation des métaux ou autres substances réfractaires; ou indirectement, par sa transformation en l'une des formes quelconques de l'énergie : action mécanique, chimique, électrique, etc. On a vu dans le paragraphe qui précède, que les anciens avaient tenté la première de ces applications et l'avaient même réalisée, s'il est vrai qu'Archimède ait incendié, à l'aide de miroirs ardents, la flotte des assiégeants de Syracuse. Un siècle après, le grand géomètre Héron d'Alexandrie, qui inventa tant d'ingénieuses machines, imagina un appareil où l'action de la chaleur du Soleil, dilatant l'air contenu dans un globe, faisait monter de l'eau dans la branche d'un siphon : c'est le premier essai connu du second mode d'utilisation de la chaleur solaire. Salomon de Caus, ce précurseur de Papin pour l'emploi de la vapeur comme force motrice, songea également à demander au Soleil la force capable de faire mouvoir l'eau dans une sorte de pompe : il décrit, sous le nom de *fontaine continuelle*, une machine qui est une véritable pompe solaire; l'emploi des verres ardents pour concentrer les rayons et augmenter leur puissance y est nettement indiquée. Diverses autres tentatives furent ébauchées en vue de l'un ou de l'autre problème : mais nous avons cité les plus importantes parmi celles qui avaient pour objet d'obtenir de hautes températures, et les autres n'offrent qu'un intérêt de curiosité historique.

Ajoutons seulement à ce que nous avons dit, que Lavoisier ne se borna point à des essais du grand verre ardent de Trudaine, décrit plus haut sous le nom de verre ardent de Bernières; le grand chimiste l'utilisa pour des recherches expérimentales fort intéressantes pour l'époque. On trouve dans ses

Mémoires[1] le détail des deux cent vingt expériences faites sur toutes sortes de minéraux, de substances réfractaires. Il est vrai que là encore il s'agit d'applications scientifiques, non d'usages industriels. De Saussure, dont nous avons cité l'héliothermomètre, dans le chapitre de la première partie de ce volume consacré à la mesure de l'énergie des radiations solaires, construisit en 1769 un appareil formé de cinq caisses superposées, en verre blanc de Bohême : exposé au Soleil pendant plusieurs heures, cet appareil donna, sous la cinquième caisse, une température de 70° R. (87°,5 C.). « Les fruits exposés, dit-il, à cette chaleur s'y cuisent et rendent leur jus. » En perfectionnant cette disposition, dont l'idée lui avait été suggérée par les effets qu'obtiennent les jardiniers dans les serres, sous les châssis et les cloches, de Saussure obtint une chaleur de 128° R., soit 160° centigrades. Il songea à utiliser cette concentration de la radiation solaire, « mais seulement, dit-il, pour des distillations, des décoctions, ou en général pour des opérations qui ne demandaient pas un degré de chaleur fort supérieur à celui de l'eau bouillante. » Du reste, à l'époque où le célèbre physicien se livrait à ces essais, on ignorait la propriété que possèdent le verre et les autres substances diathermanes, de transmettre en proportions inégales les rayons de diverses réfrangibilités; on ne savait point que si une lame de verre donne accès à la chaleur lumineuse, elle arrête au retour les radiations obscures. Pour de Saussure, les effets de concentration observés à l'aide de son héliothermomètre étaient uniquement dus à ce que les parois vitrées dont il était formé s'opposaient au refroidissement produit par le contact de l'air extérieur. Les travaux de W. Herschel, et plus tard ceux de Melloni et d'autres physiciens, ont permis de se rendre compte de ces effets, ainsi que nous l'avons vu plus haut. Nous n'avons point à revenir sur cette

1. *Détail des expériences exécutées au moyen du grand verre ardent* (du mois d'août 1772 au mois d'août 1773), t. III des *Œuvres complètes* de Lavoisier.

John Herschel s'était assuré qu'un thermomètre placé dans la même localité se soutenait pendant des heures entières à un degré supérieur à ce qu'il fallait pour cuire de la viande avec des assaisonnements. »

A l'époque (1859) où le spirituel et savant académicien indiquait en ces termes la possibilité d'une application aussi simple des lois de la chaleur rayonnante, des essais venaient d'être tentés par un professeur d'un de nos lycées, M. Mouchot. Les premiers appareils de ce physicien étaient fort simples. Une chaudière métallique, noircie au dehors, placée sous deux ou trois cloches de verre concentriques, formaient son générateur. Un réflecteur en fer-blanc composé de deux lames cylindriques soudées à angle droit servait à projeter la chaleur sur la chaudière. La forme de ces deux parties principales de ses appareils fut variée de diverses manières. Voici la description de celle à laquelle M. Mouchot s'arrêta d'abord. Nous laissons la parole à l'inventeur :

« J'ai pris un bocal en verre dont la paroi latérale n'était guère plus épaisse qu'une vitre et dans lequel je pouvais facilement introduire un vase cylindrique en cuivre ou en fer battu dont les bords s'appuyaient sur ceux du bocal; puis j'ai mis sur le tout un couvercle en verre, et cette espèce de marmite solaire m'a fourni d'aussi bons résultats que l'appareil précédent; car, étant placée au foyer du réflecteur en plaqué d'argent, elle faisait bouillir en une heure et demie 3 litres d'eau à la température initiale de 15°.

« Comme cette nouvelle chaudière était d'une forme assez commode, je m'en suis servi pour différents essais.

« Elle m'a permis, par exemple, de confectionner au Soleil un excellent pot-au-feu, formé d'un kilogramme de bœuf et d'un assortiment de légumes. Au bout de quatre heures d'insolation, le tout s'est trouvé parfaitement cuit, malgré le passage de quelques nuages sur le Soleil; et le consommé a été d'autant meilleur que l'échauffement de la marmite s'était produit avec une grande régularité.

chapiteau ayant été mis en communication avec un serpentin plongé dans un courant d'eau froide, tandis que le vase métallique, contenant 2 litres de vin, était placé dans le bocal, au foyer du réflecteur, j'ai recueilli l'alcool au bout de quarante minutes d'insolation. Comme l'appareil s'échauffait lentement et d'une manière continue, cet alcool était très concentré et possédait un arome des plus agréables[1]. »

Avec son réflecteur à plaqué d'argent devant lequel il installait une broche garnie d'une pièce de bœuf ou de mou-

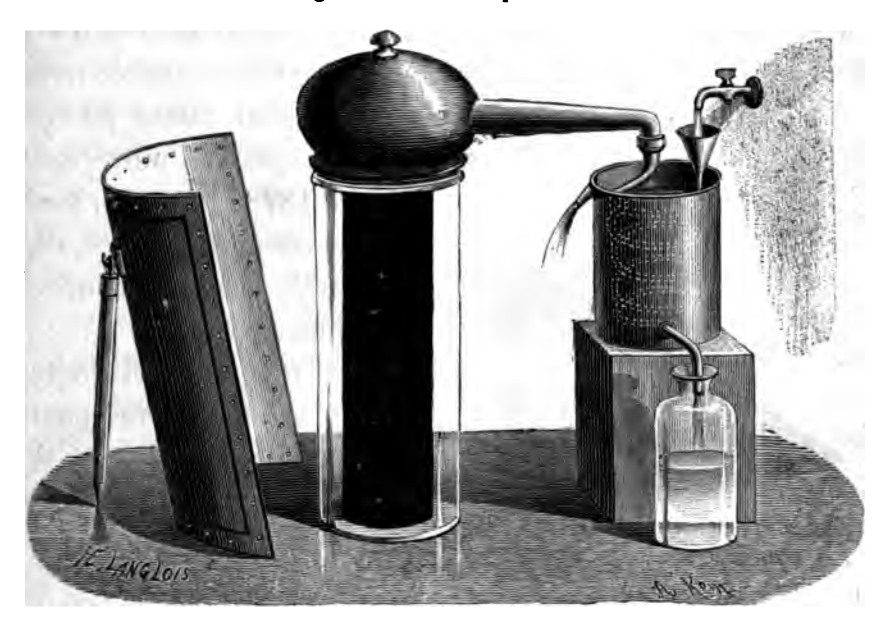


Fig. 320. — Alambic solaire de M. Mouchot.

ton, M. Mouchot obtenait un rôti dont la cuisson ne laissait rien à désirer. A la vérité, le goût de la viande ainsi cuite au Soleil était détestable, ce qu'il attribue à l'action des rayons chimiques. En plaçant une vitre jaune ou rouge devant la rôtissoire, ces rayons sont éliminés.

Le succès de ces premières tentatives engagea M. Mouchot à poursuivre la solution du problème autrement important de la transformation de la chaleur solaire en agent mécanique. Il

1. *La chaleur solaire et ses applications industrielles*, par M. A. Mouchot.

s'agissait de savoir si son générateur pouvait, en portant l'eau de la chaudière à l'ébullition, produire une quantité de vapeur suffisante pour faire mouvoir une machine à basse ou moyenne pression. Nous allons voir qu'il ne fut pas moins heureux dans cette tentative que dans les précédentes.

§ 3. LE GÉNÉRATEUR SOLAIRE DE M. MOUCHOT.

Après divers essais et de nombreuses expériences faites à Alençon, à Rennes et à Tours, M. Mouchot s'est arrêté, pour son appareil, à la forme suivante, que nous allons décrire d'après l'inventeur, tel qu'il figurait à l'Exposition universelle de 1878, tel qu'il [illegible] fonctionné à Tours, [illegible] 1875, sous de [illegible] dimensions.

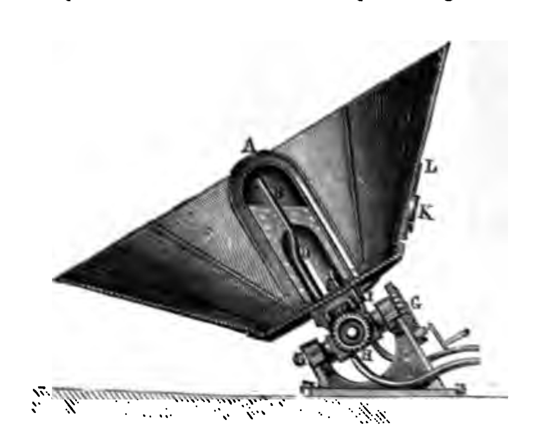


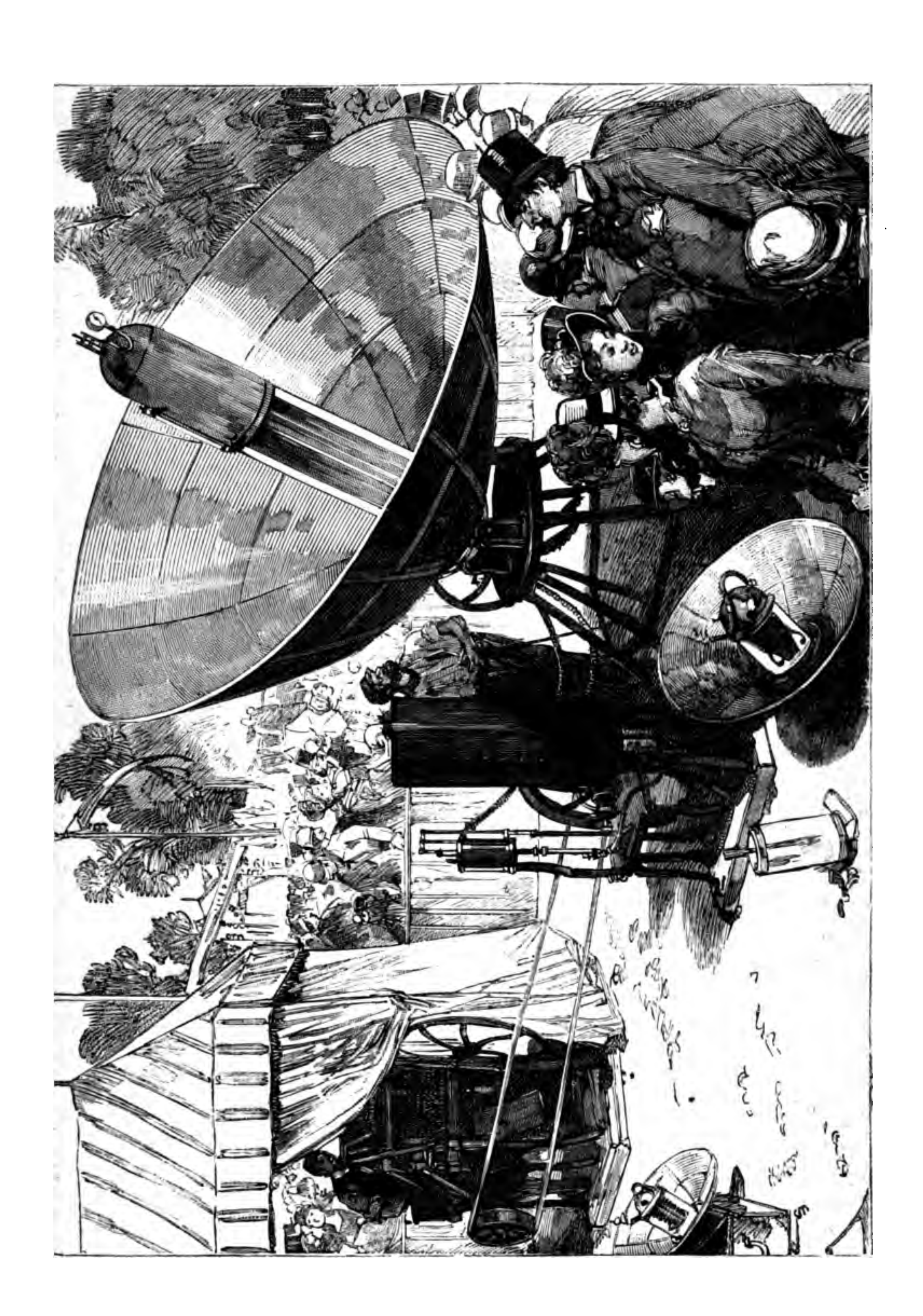
Fig. 521. — Générateur solaire de M. Mouchot.

Trois pièces [illegible] composent le [illegible] ou générateur s[illegible] miroir mé[illegible] linéaire, [illegible] rayons [illegible] Soleil : [illegible] noircie, [illegible] cide avec ce foyer : une enveloppe de verre, [illegible] jusqu'aux parois de la chaudière les ray[illegible] S[illegible] s'opposant à leur sortie, dès que l'absorption [illegible] en rayons obscurs.

Le réflecteur F (fig. 521) a la forme d'un [illegible] parallèles; c'est une sorte d'abat-jour [illegible] vers le Soleil. La génératrice de ce [illegible] un angle de 45° : l'avantage de cette forme, [illegible] montré Dupuis au siècle dernier, c'est que, [illegible] ouverture du miroir, c'est celle qui donne le maximum [illegible]

tensité au foyer, tous les rayons incidents se réfléchissant normalement à l'axe. Douze secteurs en plaqué d'argent forment la paroi réfléchissante du miroir; ils sont portés par une armature en fer et peuvent glisser à coulisse dans leur châssis, ce qui permet de les enlever aisément pour le nettoyage. Un disque en fonte ajouré forme le fond du miroir, et c'est au centre que s'élève la chaudière en cuivre composée de deux enveloppes concentriques en forme de cloche reliées à leur base par une bride en fer. C'est entre ces deux enveloppes qu'on met l'eau d'alimentation. Une cloche de verre A, de même forme qu'elle, entoure la chaudière et repose par son pied au fond du miroir. Les deux tiers de la capacité sont occupés par l'eau, l'autre tiers sert de chambre de vapeur. Un tube D en cuivre, s'ouvrant d'un côté dans cette chambre, communiquant de l'autre côté, par un tuyau flexible, avec le moteur, amène la vapeur à ce dernier. En I, sur la conduite de vapeur, sont fixés les appareils de sûreté; en L et en K, le niveau d'eau et le manomètre. Enfin un second tuyau flexible, partant du pied de la chaudière, sert à son alimentation.

Pour que le Soleil envoie toujours le faisceau de ses rayons parallèlement à l'axe du réflecteur, on comprend que le générateur doit pouvoir prendre un double mouvement, de rotation uniforme (de 15° par heure) autour d'un arbre parallèle à l'axe du monde, et d'inclinaison graduelle sur cet arbre, pour suivre avec les saisons la déclinaison du Soleil. C'est le double mouvement qu'on donne aux lunettes des équatoriaux dans les observatoires, ou ce qu'on nomme un mouvement parallactique. Mais ici il s'agissait de résoudre la question par des moyens simples, peu coûteux. M. Mouchot l'a fait de la façon suivante : « L'appareil, dit-il, s'appuie par des tourillons sur un arbre perpendiculaire à leur axe, et cet arbre forme, du nord au sud, avec l'horizon, un angle égal à la latitude du lieu. De là résultent deux mouvements, qui permettent au générateur de suivre le cours du Soleil, puisque, par une demi-révolution de l'arbre, il tourne du levant au couchant,




THE ASTOR LIBRARY
NY

ces appareils suffirent pour rôtir, en vingt-deux minutes, un demi-kilogramme de bœuf, pour confectionner en une heure et demie des étuvées qui exigent quatre heures avec un feu de bois ordinaire. Les alambics solaires portèrent 3 litres de vin à l'ébullition en une demi-heure, et donnèrent une eau-de-vie fine, franche de tout mauvais goût. Une seconde distillation faisait prendre à la même eau-de-vie toutes les qualités d'une bonne liqueur de table.

Tels étaient les principaux résultats obtenus à Paris par



Fig. 322. — Alambic solaire.

l'inventeur de cette ingénieuse machine, dont les applications devaient intéresser surtout, dans la pensée de M. Mouchot, les contrées où le ciel reste pur pendant des mois entiers et dont le Soleil est la plus précieuse ressource. Il était intéressant répéter les expériences qui précèdent dans les conditions que peuvent présenter de telles régions. C'est ce que fit l'auteur l'année suivante aux environs d'Alger. Avec un récepteur solaire ayant un miroir de $3^{m},80$, il fit marcher une machine horizontale sans détente ni condensation, à raison de 120 tours par minute, sous la pression constante de $3^{atm},5$. « Le calcul,

dit-il, indiquant alors un travail disponible d'environ 8 kilogrammètres, j'en ai conclu la possibilité de faire actionner par mon récepteur une pompe donnant le débit d'une noria commune. Le 18 mars, le succès répondait à mon attente, et je voyais un appareil élévatoire encore bien imparfait donner un débit de 6 litres par minute à $3^m,50$ ou de 1200 litres par heure à 1 mètre, et lancer à 12 mètres un jet d'arrosage. Ce résultat, qu'il sera facile d'améliorer, s'obtient d'une manière constante de huit heures du matin à quatre heures du soir, et ni les vents les plus forts, ni les nuages passagers ne le modifient sensiblement[1]. »

On doit à M. A. Pifre, qui avait aidé M. Mouchot dans ses expériences et essais antérieurs, et qui a été chargé par ce dernier de poursuivre l'étude pratique de ses récepteurs solaires, diverses modifications, dont les plus importantes consistent dans un changement de forme du miroir, et dans un changement de forme de la chaudière. Voici comment cet ingénieur rend compte des motifs qui l'ont porté à faire ces changements :

« La surface réfléchissante adoptée par M. Mouchot, dit-il, était celle d'un tronc de cône à génératrice rectiligne inclinée de 45° sur l'axe. La chaleur réfléchie chauffait la chaudière beaucoup plus à sa partie supérieure qu'à sa partie inférieure. Pour remédier à cet inconvénient, j'ai cherché à me rapprocher du paraboloïde de révolution.

« Le nouveau réflecteur est formé de trois troncs de cône se raccordant suivant un parallèle, c'est-à-dire que sa génératrice est une ligne brisée. Le milieu de cette génératrice reste incliné à 45°. Sa partie inférieure forme un angle au centre plus ouvert et sa partie supérieure un angle plus fermé, mais tous les deux assez faibles pour que, suivant les expériences de M. Desains, la chaleur réfléchie ne perde rien de son inten-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1880, t. I.

sité en arrivant sur la chaudière. Le foyer se trouve ainsi concentré sur une longueur beaucoup moindre, la zone de chauffage maximum se rapproche de la partie inférieure de la chaudière, et les lois d'un chauffage rationnel sont mieux observées.

« Cette disposition du réflecteur permet également de diminuer de moitié la hauteur de la chaudière, sans qu'il soit nécessaire d'augmenter pour cela son diamètre, car aupara-

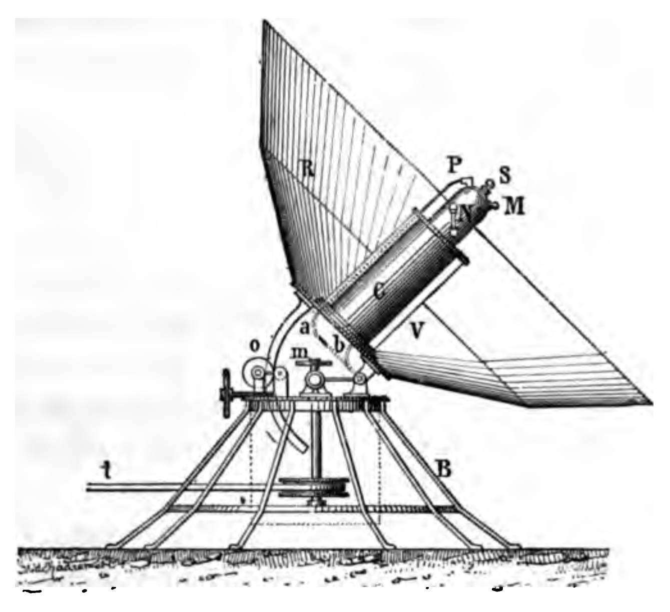


Fig. 323. — Récepteur solaire Mouchot, modifié par M. Pifre, ou insolateur[1].

vant on était obligé de glisser un cylindre plein dans son intérieur, afin de diminuer sa capacité. Il en résulte que les pertes par rayonnement extérieur diminuent ainsi de moitié. Cette modification est d'une importance capitale dans le cas de production de vapeur sous pression[2]. »

M. Pifre affirme avoir ainsi accru le rendement des appareils

1. R, réflecteur; C, chaudière; V, manchon de verre; P, prise de vapeur; N, dôme de vapeur et niveau d'eau; S, soupape de sûreté; M, manomètre; B, support de l'appareil; *a*, tuyau d'arrivée de la vapeur; *b*, tuyau d'alimentation de la chaudière; *m*, volant de la machine; *t*, courroie de transmission; *o*, mécanisme d'orientation. L'insolateur que représente la figure 323 a, comme on voit, un réflecteur qui est formé de deux troncs de cône seulement, au lieu de trois.

2. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1880, t. II.

de 50 à 80 pour 100, utilisant $12^{cal},12$ par minute et par mètre carré de surface d'insolation, alors que les appareils anciens donnaient, même à Biskra, $9^{cal},2$ seulement. Ces résultats ont été contestés par M. Mouchot[1], qui donne d'ailleurs 75 pour 100 comme rendement de son récepteur expérimenté en Algérie. Il y aurait, croyons-nous, un moyen simple de décider la question de la supériorité de l'une ou de l'autre forme donnée au réflecteur : ce serait d'en appeler à des expériences comparatives faites avec deux appareils de chaque système ayant des dimensions égales et fonctionnant au même endroit et aux mêmes instants.

Une commission nommée pour expérimenter l'appareil de M. Pifre, et pour en évaluer le rendement pratique, a fait à Montpellier, dans le courant de 1881, une série d'expériences que le rapporteur, M. Crova, résume en ces termes :

« Les expériences ont été faites au polygone du Génie, sur une élévation parfaitement exposée dans tous les sens; elles ont duré du 1er janvier au 31 décembre 1881, et ont été faites d'heure en heure, tous les jours pendant lesquels le Soleil a brillé et les observations ont été possibles.

« Les rayons solaires, concentrés dans la ligne focale du miroir, étaient reçus sur une chaudière noircie qui en occupait l'axe, et qui était entourée d'un manchon de verre. L'eau entrait en ébullition, et sa vapeur se condensait dans un serpentin refroidi par un courant d'eau. Les formules de Regnault permettaient de déduire, du poids de l'eau distillée par heure, le nombre de calories utilisées par l'appareil.

« Des observations actinométriques, faites d'heure en heure, on déduisait le nombre de calories incidentes pendant chaque heure, en prenant la moyenne de l'actinomètre au commencement et à la fin de chaque heure.

« On mesurait en même temps la température de l'air, son état hygrométrique, et la chaleur du Soleil qui permettait de

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1881, t. I.

calculer l'épaisseur atmosphérique traversée au moyen de la formule de Laplace.

« Le nombre des calories utilisées et celui des calories incidentes étaient exprimés en grandes calories (kilogramme-degré), reçues en une heure sur 1^{m},9 de surface normale aux rayons solaires; leur quotient donnait le rendement économique de l'appareil.

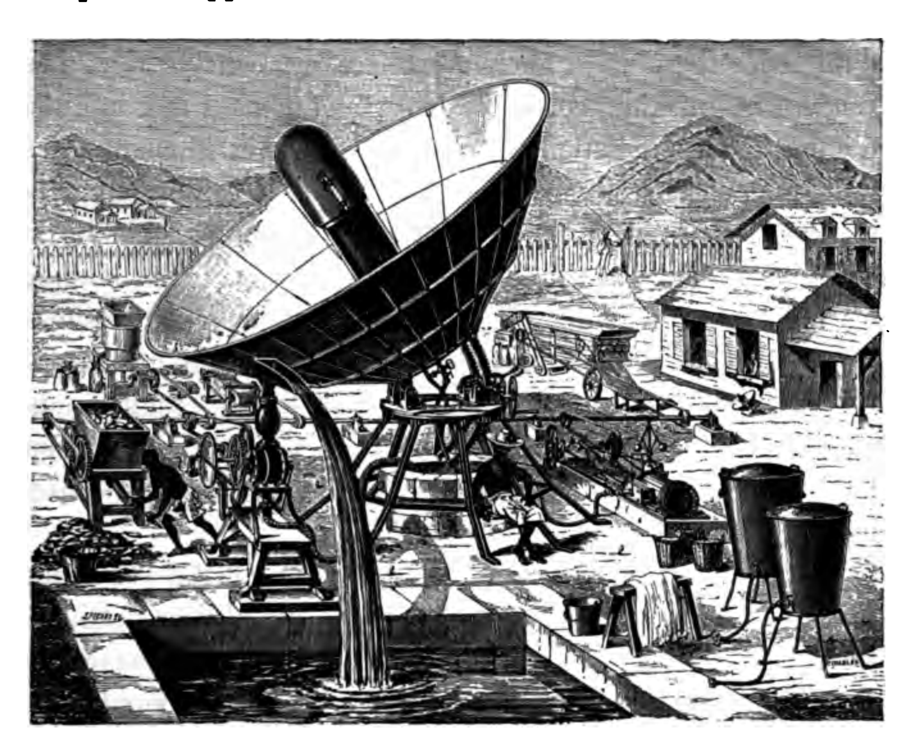


Fig. 324. — Utilisation mécanique de la chaleur du Soleil. Pompe solaire (système Mouchot-Pifre).

« Voici les principaux résultats obtenus pendant cent soixante-seize journées, qui ont donné lieu à neuf cent trente observations, durant lesquelles on a distillé 2725 litres d'eau :

MOYENNE GÉNÉRALE DES VALEURS MESURÉES PENDANT L'ANNÉE 1881, ET RAPPORTÉES A 1 MÈTRE CUBE ET A 1 LITRE.

		Maximum.	
	cal.	cal.	
Chaleur reçue directement. . . .	615,1	945,0	(25 avril)
Chaleur utilisée par l'appareil. .	258,8	547,5	(15 juin)
Moyenne des rendements	0,491	0,854	(14 juin)

« Le rendement n'est pas proportionnel à l'intensité calorifique des radiations solaires, et ne varie presque jamais dans le même sens. Les radiations ont lieu, en effet, à Montpellier, au printemps, époque à laquelle l'air est à son maximum de sécheresse et de transparence calorifique. La quantité absolue de chaleur utilisée dépend, au contraire, essentiellement de la température de l'air ; plus celle-ci est élevée, c'est-à-dire plus la chute de température est faible, moins le refroidissement a d'influence, et plus la chaleur utilisée est considérable. Les rendements maxima correspondent généralement aux minima d'intensité des radiations ; par les plus fortes intensités, les radiations obscures, non transmissibles par le verre, sont arrêtées par le manchon, et le rendement diminue, quoique la quantité de chaleur utilisée augmente. L'inverse a lieu lorsque les radiations incidentes sont très affaiblies par leur transmission au travers d'une atmosphère douée d'une faible transparence calorifique, qui arrête les radiations de grandes longueurs d'onde, et transmet celles qui ne subissent qu'une bien faible perte dans leur passage à travers le manchon qui enveloppe la chaudière.

« Dans nos climats tempérés, le Soleil ne brille pas d'une manière assez continue pour que l'on puisse utiliser pratiquement ces appareils. Dans des climats très secs et chauds, la possibilité de leur utilisation dépend d'un certain nombre de circonstances que nous n'avons pas à discuter ici, telles que la difficulté plus ou moins grande de s'y procurer du combustible, le prix et la facilité de transport des appareils solaires[1]. »

Bien que les conclusions numériques de ce rapport soient assez notablement moins favorables que celles qu'annonçait M. Pifre, on voit que l'idée d'utiliser industriellement la chaleur solaire, étudiée et poursuivie avec tant de persévérance par M. Mouchot, a été conduite par l'inventeur des récepteurs solaires à un degré de réalisation pratique qui permet d'en-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences pour* 1882, t. I.

trevoir de prochaines et sérieuses applications. Les récepteurs solaires de M. Mouchot, ou les insolateurs de son continuateur M. Pifre, construits sous des dimensions variées, en rapport avec leurs usages, seront-ils bientôt en usage dans les pays brûlés du Soleil, ici servant aux usages culinaires, là distillant et fabricant de l'alcool ou des parfums sous forme d'alambics, ou bien puisant l'eau des sources sous forme de pompes, convertissant directement en force la chaleur inépuisable du grand foyer de notre monde? Sans partager au même degré l'enthousiasme des inventeurs, enthousiasme si naturel et si nécessaire d'ailleurs à la réussite de toutes les entreprises sortant tant soit peu des ornières battues, nous espérons qu'une partie au moins des services attendus des appareils solaires sera bientôt réalisée.

FIN DU QUATRIÈME VOLUME.



TABLE DES FIGURES

PLANCHES EN NOIR ET EN COULEUR

FIGURES INSÉRÉES DANS LE TEXTE

FIN DE LA TABLE DES FIGURES.

TABLE DES MATIÈRES

LA CHALEUR

PREMIÈRE PARTIE

LES PHÉNOMÈNES ET LEURS LOIS

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA CHALEUR

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

8058. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.







